FUNDAMENTO FISICO DEL CAMBIO CLIMATICO

INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

VENTANAS DE LA MENTE

La melatonina

Electrosensibilidad en los tiburones

¿Fármacos raciales?

Glaciares del Kilimanjaro

¿Existen estrellas de quarks?



OCTUBRE 2007

6,00 EUROS



Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Octubre de 2007

Número 373



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michael Shermer, Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
VICE PRESIDENT Frances Newburg
GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Recoletos, 11 3.º D
28001 Madrid
Tel. y fax 915 759 278
Móvil 649 933 834

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Bruno Moreno: *Apuntes*, *Ciencia y sociedad* y *El fundamento físico del cambio climático*; Marián Beltrán: *¿Fármacos raciales?* y *Desarrollo sostenible*; Joandomènec Ros: *Electrosensibilidad en los tiburones*; Sònia Ambròs: *Glaciares del Kilimanjaro*; Teodoro Vives: *¿Existen estrellas de quarks?*; Luis Bou: *Engranajes paradójicos*; J. Vilardell: *Hace...*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; M.ª Rosa Vallés: *Ciencia y gastronomía*



Portada: Jens Nieth, *zefa/Corbis*

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

SEGREGACIÓN URBANA. «Los ciudadanos estadounidenses caucásicos y negros se están escindiendo según un nuevo patrón de segregación. En todos los grandes centros urbanos pasa del mismo modo: las familias blancas acomodadas se mudan del centro a las afueras; los negros procedentes del sur engruesan las filas de la población pobre que queda. Esos cambios poblacionales conllevan unas profundas consecuencias económicas. De primera importancia es la disminución de parte de la actividad económica en los centros urbanos. En casi todas las ciudades, los grandes almacenes del centro están perdiendo ventas frente a los centros comerciales del extrarradio. Entre 1948 y 1954 las ventas al por menor en el barrio céntrico financiero de Chicago descendieron un cinco por ciento, mientras que las ventas en las afueras crecieron un 53 por ciento.»

PRECIPITACIÓN. «Se ha descifrado la escritura Lineal A. Hace sesenta años el arqueólogo británico sir Arthur Evans desenterró unas 2000 tablillas de arcilla cocida en las ruinas de un antiguo palacio de Cnosos, en Creta. Tan extraña escritura de los antiguos hace años que se resiste a la lectura. Cyrus H. Gordon, de la Universidad Brandeis, especialista en lengua y cultura semíticas, la ha descifrado ahora con el sorprendente descubrimiento de que corresponde a la lengua de los antiguos babilonios, el acadio.»

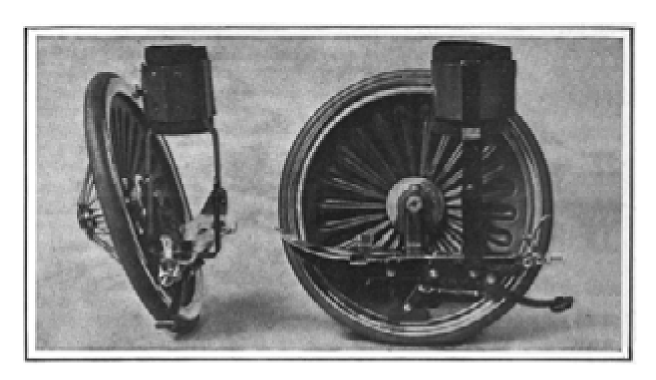
[NOTA DE LA REDACCION: El trabajo de Gordon sigue siendo objeto de polémica; la escritura Lineal A no se ha traducido todavía.]

...cien años

UN DEVOTO DE LAS PASAS. «Resulta lamentable que un artículo alimenticio tan económico y estimable como es la pasa de Corinto se menosprecie tanto. Su valor dietético no es reconocido y sufre prejuicios injustificados. Preparada de forma adecuada, la pasa de Corinto podría convertirse en un artículo más de la alimentación cotidiana de la gente, que parece elegir los alimentos y prepararlos ignorando lo que puede ser nocivo. He aquí una comparación interesante, que debe resultar clara para una inteligencia media: las pasas de Corinto contienen un 54,87 por ciento más de alimento que el magro de vacuno. —Sir Francis Henry Laking, doctor en medicina, médico del Rey de Inglaterra [Eduardo VII].»

SIERPES E HIPNOSIS. «Es una creencia generalizada que las serpientes poseen la facultad de capturar sus presas lanzando un misterioso hechizo sobre las víctimas. Incluso los científicos han considerado seriamente ese supuesto poder hipnótico sobre las aves. Alfred Russell Wallace lo atribuyó a 'influencias ópticas, afines a la hipnosis'. En las zonas rurales de Europa y de Norteamérica, las serpientes encantadoras de pájaros se consideran a la par que fenómenos tan indiscutidos como la pesca con caña y señuelo. Pero mis experimentos del último verano con serpientes de cascabel desmienten la teoría de la fascinación de los ofidios. Estos, cuando se disponen a atacar, prescinden de todo artificio hipnótico. Una elevación gradual de la cabeza, un acercamiento silencioso, luego una lenta contracción de los anillos, un movimiento rápido como un dardo y una retirada calmosa.»

***HOMO ROTALIS* TEMPRANO.** «La causa de que los patines de ruedas no puedan emplearse en firmes de macadán es que el escaso diámetro de sus ruedas hace que éstas acusen todas las depresiones e irregularidades de la calzada. Un inventor suizo ha ideado los patines que se muestran en la ilustración adjunta.»



Ruedas para calles en mal estado, 1907

...ciento cincuenta años

EL BARCO DEL ORO. «Afirman muchos de los supervivientes del *Central America* que a bordo de éste había muy pocos cuya riqueza en mano no ascendiera a centenares de dólares, mientras que muchos cifraban el valor de su oro en miles de dólares. La mayoría de los pasajeros eran mineros de regreso (de California); algunos de retorno esperando una vida más desahogada, otros para recoger a su familia y volver a la tierra del preciado metal. Pero conforme la tempestad seguía rugiendo, se iban desvaneciendo tales pensamientos de fortuna. Cuando, el sábado, se hizo patente que en cualquier momento podían acabar devorados por las olas, se despojaron de sus cinturones de caudales y esparcieron el oro sobre el piso de los camarotes, diciendo a quienes se atrevían a recogerlo que comprobaran el peso, pues unas pocas onzas podrían arrastrarlos a la muerte.»

[NOTA DE LA REDACCION: Hundido frente a la costa de Carolina del Norte, los restos se localizaron en 1987; hasta ahora se han recuperado tres toneladas de oro.]

APUNTES

GENETICA

Neutralización de una perturbación del desarrollo

Una discapacidad producida en el transcurso del desarrollo por un gen mutado puede quedar neutralizada con una segunda mutación. Al menos, en ratones. El síndrome del X débil, que provoca deficiencias de atención, ansiedad y disonancia cognitiva, afecta a uno de cada 4000 niños y a una de cada 6000 niñas. Está causado por una mutación de un gen del cromosoma X llamada *retraso mental por X frágil 1* (FMR1, según sus siglas en inglés). Como resultado de esta mutación, el cuerpo no sintetiza cantidad suficiente de la proteína cifrada por el gen. Mansuo Hayashi, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, encontró una forma de contrarrestar la deficiencia: la supresión del gen para la enzima quinasa activada p21. Si ese proceso operase en seres humanos, sería posible neutralizar el síndrome de X frágil mediante un medicamento que inhibiese la síntesis de quinasa activada p21.

—Nikhil Swaminathan

El trabajo aparece en el número del 3 de julio de Proceedings of the National Academy of Sciences USA.

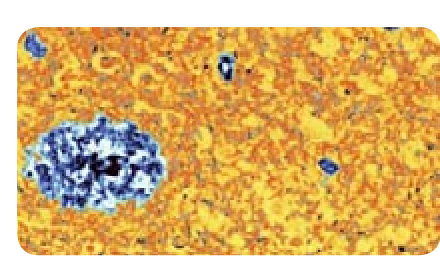
Puntos frágiles: Los extremos del cromosoma X están dañados en el síndrome del X frágil.

BIOLOGIA MOLECULAR

Priones contra alzheimer

Ciertas proteínas deformes, denominadas priones, constituyen la causa de la enfermedad de las vacas locas y de enfermedades cerebrales similares. No está claro, sin embargo, qué papel cumplen esas moléculas en su estado normal, sin deformar. En los seres humanos, las proteínas priónicas normales podrían proteger de la enfermedad de alzheimer. Quienes sufren esa patología degenerativa presentan, acumulada en el cerebro, la proteína beta-amiloide plegada de forma incorrecta. El grupo encabezado por Nigel Hooper, de la Universidad de Leeds, ha descubierto que la existencia de altos niveles de proteínas priónicas normales en las células humanas evita la formación de beta-amiloide, al inhibir la enzima beta-secretasa. Los cerebros de ratones transgénicos, que no sintetizan proteínas priónicas normales, mostraban niveles significativamente más altos de beta-amiloide. Hooper afirma que las proteínas priónicas podrían evitar la aparición precoz del alzheimer, si no proteger también contra el estrés por oxidación, que está asociado al alzheimer y a otras enfermedades neurodegenerativas. La investigación ulterior podría desembocar en la preparación de nuevos fármacos cuya diana sea la beta-secretasa.

—Charles Q. Choi



Proteínas priónicas quizás eviten la formación de las placas amiloides características del alzheimer.

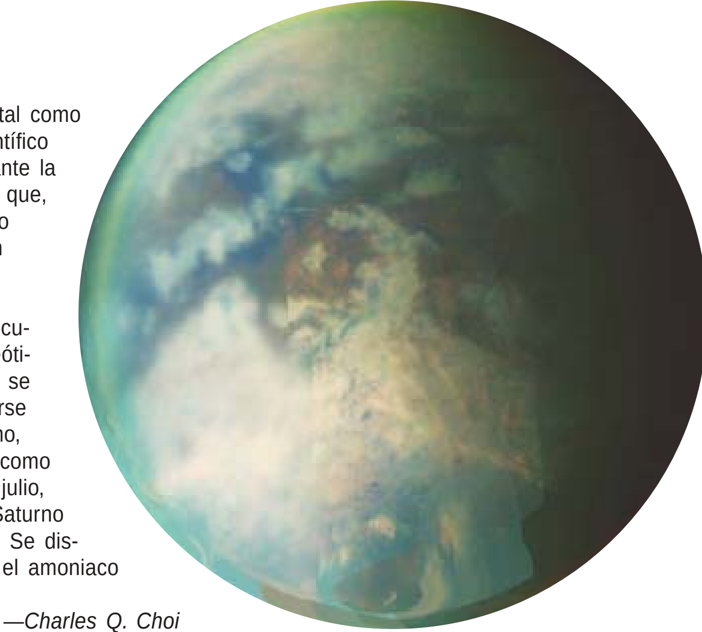
El equipo informa de sus averiguaciones en el número del 26 de junio de Proceedings of the National Academy of Sciences USA.

EXOBIOLOGIA

La vida, tal como no la conocemos

La búsqueda de extraterrestres debe ir más allá de la vida tal como la conocemos. Se lo ha advertido a la NASA un comité científico del Consejo de Investigación Nacional de Estados Unidos, ante la pretensión de la agencia espacial de buscar formas de vida que, al igual que sucede en la Tierra, se basen en agua, carbono y ADN. La docena de miembros del comité, especialistas en genética, química, fisiología y otras disciplinas, recomiendan que la NASA tenga en cuenta la que llaman "vida peculiar". En experimentos de biología sintética se han diseñado moléculas que, aunque codifican datos genéticos, tienen más nucleótidos que el ADN o el ARN. Las reacciones químicas en que se sustentase la vida de los seres extraterrestres podrían basarse en el amoniaco o el ácido sulfúrico. No en el agua. Asimismo, los organismos por descubrir podrían servirse de minerales como catalizadores, en lugar de enzimas. En su informe del 6 de julio, los científicos del Consejo señalaron que Titán, la luna de Saturno (*véase la fotografía*), merecía en especial una nueva misión. Se disponen de nuevos indicios de que en su interior se mezclan el amoniaco líquido y el agua.

—Charles Q. Choi



EVOLUCION

Ulceras de las profundidades

Los genes que favorecen que los gérmenes nocivos prosperen en las cálidas temperaturas del cuerpo humano surgieron, parece, de un ADN que permite que los microorganismo sobrevivan en humeros hidrotermales, hipercalientes, de los fondos marinos. La Agencia Japonesa para la Ciencia y Tecnología de la Tierra y del Mar ha comparado los genomas de dos bacterias de las profundidades marinas con los de *Helicobacter*, la bacteria causante de las úlceras, y *Campylobacter*, la principal causa de diarrea, presente en los alimentos. Según estos investigadores, los genes que probablemente ayudan a las bacterias de las profundidades del mar a mantener relaciones simbióticas con otros organismos que habitan en los humeros hidrotermales permiten que sus parientes del interior del cuerpo humano obvien el sistema inmunitario. Las enzimas que ayudan a los microorganismos de los humeros a vivir de hidrógeno permiten que *Helicobacter* y *Campylobacter* hagan lo mismo en el sistema digestivo. Al igual que sus parientes nocivos, las bacterias de las profundidades oceánicas tienen pocos genes de reparación de ADN; por eso, menudean las mutaciones y los microorganismos se adaptan con presteza a las condiciones cambiantes o resisten a las respuestas inmunitarias. Los microorganismos dañinos para el ser humano debieron de evolucionar a partir de precursores que vivían en las profundidades marinas. Más tarde, adquirirían nuevos factores de virulencia mientras vivían en simbiosis con animales.

—Charles Q. Choi

Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 17 de julio

Los genes que ayudan a las bacterias a vivir en los humeros hidrotermales facilitan también que *Helicobacter* (*véase el inserto*) medre en el estómago del hombre.

HISTORIA DE LA CIENCIA

El desconocido descubridor de los púlsares

Jocelyn Bell descubrió en los datos del radiotelescopio con el que investigaba en 1967 los quarks una señal celeste que se repetía con un breve período. Poco después se asignaría su origen a estrellas de neutrones de rápida rotación, los púlsares. Charles Schisler acaba de demostrar que las emisiones de los púlsares se habían ya observado un poco antes.

Schisler era operador de radar en una base de las fuerzas aéreas estadounidenses en Alaska. Vigilaba la posible aparición de misiles balísticos intercontinentales soviéticos; su radar estaba preparado sólo para distinguir señales rápidamente variables, como el eco de las señales del propio radar al rebotar en un misil, o las por entonces desconocidas de los púlsares, y no señales más constantes. Le llamó la atención una fuente que seguía el movimiento de los cielos. Cuando reapareció un día sidéreo después, no le cupo duda de que era celeste. El hallazgo no interesó a sus superiores, pero a Schisler le picó la curiosidad y dio con un catálogo de radiofuentes celestes en una biblioteca.


En esta estación de radar de las fuerzas aéreas de EE.UU. se detectaron púlsares hace 40 años, pero nadie se enteró, salvo un operador de radar.

Comprendió entonces que había detectado una radiofuente rápidamente variable dentro de la zona radioemisora de la nebulosa del Cangrejo. Más adelante identificó otras fuentes y elaboró una lista. Pero hasta el pasado agosto no se había atrevido a hacer públicos sus hallazgos, obligado por el secreto militar a que estaba sujeto su trabajo. En pantalla no observó los trenes de señales típicos de los púlsares; la variabilidad se deduce de que su radar sólo captaba señales variables.

pulsars2007.blogspot.com

Nature 448, págs. 974-975

B. MURTON *Centro Oceanográfico Southampton/Photo Researchers, Inc.* (*fondo marino*); GARY GAUGLER *Photo Researchers, Inc.* (Helicobacter)

FISICA

O todo o (casi) nada

Según la teoría de la relatividad, la radiación electromagnética se propaga en el vacío siempre a la misma velocidad, con independencia de la energía de los fotones que la compongan. Como este principio desempeña un papel fundamental en la física actual, un resultado experimental que lo violase tendría especial trascendencia. Un extenso grupo de físicos publicó el 21 de agosto un artículo donde se exponía un resultado potencialmente de esa índole.

El telescopio de rayos gamma MAGIC, sito en el observatorio de El Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma, observó durante 24 noches de 2005 la galaxia de núcleo activo Markarian 501. En dos de esas noches, el 30 de junio y el 9 de julio, se produjeron sendos destellos muy intensos de rayos gamma. Pues bien: los fotones más energéticos del destello del 9 de julio llegaron cuatro minutos después que los de menor energía. (Los fotones del 30 de junio se concentraban en un margen más estrecho de energías, lo que impide efectuar una comparación de ese tipo.)

Cualitativamente al menos, un efecto así había sido predicho por diversos teóricos que trabajan con la teoría cuántica de lazos, un enfoque de la gravedad cuántica opuesto a la teoría de cuerdas, o con versiones minoritarias de la teoría de cuerdas, como es el caso de John Ellis, Nanopoulos y Mavromatos, que firman el trabajo junto con los miembros de la nutrida Colaboración MAGIC. La predicción se basa en una hipotética interacción cuántico-gravitatoria entre los fotones y las oscilaciones cuánticas de las escalas más pequeñas del espaciotiempo, que sería sensible a la energía de aquellos. Claro está, el retraso observado podría no deberse a ese supuesto índice de refracción del vacío dependiente de la frecuencia, sino a peculiaridades de la emisión de los fotones en la fuente. El artículo sólo puede descartar que se deba a una refracción en el plasma de la fuente a medida que los fotones se propagaban por ella de camino hacia el exterior.


Telescopio MAGIC

arxiv:0708.2889v1

DATOS

El ninot verde

Black Rock City —donde no faltan ni estafeta ni servicio voluntario de protección civil— se alza tan sólo durante una semana al año en el desierto Black Rock de Nevada, merced a un festival de arte y contracultura llamado "Burning Man" (el "ninot"). El festival se cierra con la destrucción de la "ciudad", coronada con la "cremá" de la "ciudad" y de un gran "ninot" central. El festival de este año, llamado Green Man (Ninot Verde), va de tema ecológico. Los organizadores tratarán de eliminar la huella carbónica que deja el festival. Reducirán en un 70 por ciento los residuos sólidos mediante trituración y compostaje, y se proponen sustituir los 80.000 litros de gasoil del año pasado por 80.000 litros de biocombustible local, derivado de grasas de cocina, suministrado por Bently Biofuels, de Minden, en Nevada. También instalarán un panel fotovoltaico de 30 kilowatt y se han asociado para construir otro de 150 kw para la vecina ciudad de Gerlach, que al concluir el *happening* se quedará asimismo con el otro más pequeño.

—Jonathan Scheff

Asistentes a Burning Man: 40.000
Emisiones de carbono por la quema del "hombre": 112 toneladas
Emisiones totales *in situ*: 2473 toneladas
Emisiones debidas al viaje de los participantes: 25.019 toneladas
Carbono evitado por el panel de 30 kw: 6,9 toneladas
Carbono total anualmente evitado por los paneles de 30 y 150 kw: 559 toneladas

Fuentes: Tom Price, de la plantilla de Burning Man; David Shearer y Jeff Cole, fundadores del Proyecto Coolingman

SIDA

Mutación benéfica y perjudicial

La mutación que permitió a los humanos defenderse de un antiguo virus de los monos parece habernos hecho más vulnerables al VIH-1. Los virólogos del Centro Fred Hutchinson de Investigación contra el Cáncer en Seattle han estudiado la inmunoproteína TRIM5-alpha, que protege a los monos rhesus, pero no a los humanos, del VIH-1. Encontraron que la versión humana de TRIM5-alpha protege a las células contra una porción revivida del retrovirus PtERV1 de los primates, lo cual apunta a que evolucionó para efectuar esa defensa. Sin embargo, al adaptarse a la lucha contra PtERV1, el TRIM5-alpha humano habría perdido la capacidad de luchar contra el VIH-1.

—J. R. Minkel

Science 316, págs. 1756-1758.

ROBERT WAGNER, INSTITUTO DE FISICA MAX-PLANCK (*Telescopio MAGIC*); MATT COLLINS (*abajo*)

RENDIMIENTO ENERGETICO
Lo comido por lo servido

Es de teoría económica elemental que si los precios bajan, aumentará el consumo. Las políticas dirigidas a mejorar el rendimiento energético y a reducir las emisiones de gases de invernadero asociadas al calentamiento global no tendrían por qué ser excepciones de esa ley. De ahí resulta el llamado efecto rebote, que tiene lugar cuando una elevación del consumo recorta los ahorros de energía producidos por una determinada técnica.

Sería, por ejemplo, el caso de una familia que instala un buen aislamiento en su casa para ahorrar energía y dinero, y luego decide que puede permitirse, gracias a esas economías, subir el termostato durante el invierno. Cuando entra en vigor un programa o una política que disminuye costes, se tiende a utilizar más lo así abaratado, como señala Richard Newell, economista de energía y ambiente en la Universidad Duke.

Aunque la mayoría de los expertos acepten la existencia del efecto rebote, no hay acuerdo sobre su magnitud. Dos estudios recientes arrojan diferentes resultados cuantitativos, si bien concuerdan en cuál sea la mejor manera de ajustar la tendencia humana a consumir más de algo que se ha abaratado. En el contexto del cambio climático, parece que lo más efectivo sería gravar con impuestos las emisiones de carbono.

En el pasado enero, unos economistas de la Universidad de California en Irvine publicaron un artículo en *Energy Journal* que trataba sobre el efecto rebote en la automoción: es decir, hasta qué punto el mayor rendimiento del combustible incitaba a conducir más. A partir de los datos de distancias recorridas en EE.UU. desde 1966 hasta 2001, estimaban un 10 por ciento de efecto rebote para los vehículos a motor. En otras palabras: un descenso en el coste de viajar en coche provoca un aumento del kilometraje recorrido en un 10 por ciento de la variación del coste.

Si bien el efecto se ha debilitado al aumentar los niveles de renta, la subida del precio de la gasolina ha compensado en parte ese descenso. Kurt Van Dender, uno de los autores del estudio, ha vuelto a calibrar el modelo con los precios de 2006, con el resultado de que una elevación del 58 por ciento de los precios del combustible llevaba el 10 por ciento de rebote hasta un 15 por ciento, una vez que se había pasado a utilizar vehículos de mejor rendimiento. En conjunto, sin embargo, Van Dender considera que el efecto rebote es pequeño y que, si se continúa mejorando la eficacia energética, el consumo de combustible sin duda descenderá considerablemente.

Otro estudio, publicado en el número de enero de la revista *Energy Economics*, apunta en otra dirección. En la Universidad de Umeå, se han tomado como base los datos del consumo nacional en transporte, alimentación y otros bienes para evaluar cómo influiría unas u otras mejoras del rendimiento energético, traducidas en una reducción de precios en esos sectores, en el consumo de sus productos o servicios. Por ejemplo, el modelo sueco demostró que una calefacción el 20 por ciento más eficaz aumentaría el 4,2 por ciento la demanda de transporte en coche. En general, un incremento del 20 por ciento en el rendimiento energético, en un plano macroeconómico, elevaría en un 5 por ciento las emisiones carbónicas de un país.

En el modelo de Umeå, el rendimiento del combustible también reduce el consumo de combustible, pero el problema es que entonces se utiliza el dinero ahorrado en algún otro fin, que puede emitir mucho carbono. Nos engañamos a nosotros mismos, afirma Runar Brännlund, si creemos que al mejorar el 20 por ciento el rendimiento descenderán un 20 por ciento las emisiones. Para compensar el efecto rebote, la eficiencia energética debe asociarse a otras soluciones políticas que favorezcan la reducción, y, según Brännlund, un modo de lograrlo sería encarecer el carbono, probablemente gravando las emisiones con un fuerte impuesto. Para restituir las emisiones a su nivel original en Suecia, habría que elevar en un 130 por ciento el impuesto nacional sobre el carbono, vigente desde 1991.

Brännlund señala que la Unión Europea tiene ahora en estudio una nueva norma para economizar combustible. Ciertos legisladores estadounidenses intentan también elevar el número de kilómetros que los automóviles han de poder cubrir por litro de combustible, aunque los fabricantes de automoción se oponen. En un entorno "políticamente condi-



PAGUE MENOS, CONDUZCA MAS: Si la energía es más barata, los usuarios la consumirán en mayor cantidad. Los investigadores apenas si empiezan a cuantificar este efecto en lo relativo a las emisiones de carbono.

ISTOCKPHOTO

cionado", sostiene Van Dender, "no es tan malo" regular el ahorro de combustible. Pero la teoría económica básica es tajante: la demanda responde al precio. Si el consumo de gasolina lleva un coste social aparejado que no es tenido en cuenta por quienes la gastan, no se ve cómo llegar a cualquier otra conclusión que no sea gravar con impuestos la gasolina o el carbono, sostiene Brännlund. Y aunque el efecto rebote sea pequeño, el coste social puede ser realmente elevado, según Van Dender, por el consiguiente empeoramiento de la contaminación atmosférica y la congestión del tráfico.

—Linda Baker

LINGÜISTICA

Hablando en tonos

De la misma forma que los seres humanos son genéticamente diferentes, también lo son lingüísticamente. En el mundo se hablan al menos 6800 lenguas. Una investigación sugiere que la genética podría explicar una parte de la diversidad de lenguas: habría una vinculación entre los genes y los idiomas tonales. El modo en que se produciría esa supuesto nexo sigue sin estar claro y algunos investigadores niegan que exista.

En general, los lenguajes o son tonales o no lo son. En los lenguajes tonales, como el mandarín en la China o el yoruba en Africa Occidental, la altura tonal con que se pronuncia una palabra afecta a su significado. Por ejemplo, en mandarín, la palabra *ma*, pronunciada con un tono agudo y sostenido, significa "madre", mientras que si se pronuncia con un tono grave que se agudiza significa "caballo". En español, el tono de una palabra transmite la emoción, pero no suele influir en el significado. (Una notable excepción a esta dicotomía que hemos mencionado es el idioma japonés, en el cual una palabra puede tener un significado distinto según el tono de sus sílabas.)

Semejante distinción podría arraigarse en la genética, según proponen los lingüistas de la Universidad de Edimburgo Robert Ladd y Dan Dediu. Han analizado secuencias de ADN procedentes de bases de datos de acceso público para investigar dos genes vinculados al crecimiento y desarrollo del cerebro, *ASPM* y *Microcephalin*. Se proponían averiguar la correlación de esos genes con 26 características lingüísticas, el número de consonantes, por ejemplo, y qué variaciones presentaban entre 49 poblaciones diferentes del Viejo Mundo.

Descubrieron que los portadores de formas recientes, en términos evolutivos, de tales genes solían hablar lenguajes no tonales. Estas formas más recientes de *ASPM* y *Microcephalin* aparecieron hace unos 5800 y 37.000 años, respectivamente. Con anterioridad se había ya mostrado que dichas mutaciones no afectan a la inteligencia, ni al tamaño del cerebro, ni a la sociabilidad. Por su parte, Ladd y Dediu sostienen, en el número del 26 de junio de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, que sí causan sutiles diferencias en la corteza cerebral relacionadas con el lenguaje y con el tono.



MICHAEL POLE *Corbis*

ES IMPRESCINDIBLE captar bien la altura tonal con que se pronuncia una palabra en chino porque el significado puede depender de ella.

No existen unos "genes del idioma chino". Si se educase a un niño chino en Burgos, no hablaría chino, ni viceversa, pero sí cabe que los individuos puedan tomar, en razón de sus genes, caminos ligeramente distintos para aprender ciertos idiomas. Podría incluso suceder, sostiene Ladd, que algunas personas tengan más facilidad para aprender lenguajes tonales que otras.

En un bando distinto militan quienes niegan cualquier predisposición genética a los lenguajes tonales. Las investigaciones realizadas por Diana Deutsch, de la Universidad de California en San Diego y experta en percepción y cognición, sugieren que las personas que hablan idiomas tonales tienen mayor probabilidad de poseer oído absoluto o perfecto, es decir, la capacidad de identificar cualquier altura tonal que escuchen sin necesidad de una nota de referencia. De su trabajo se infiere que el oído perfecto no se funda en los genes; en consecuencia, tampoco los idiomas tonales. Deutsch añade que el aparente vínculo que encontraron Ladd y Dediu podría deberse a una simple coincidencia que sería desechada por nuevas investigaciones, algo con lo que Ladd está de acuerdo.

En cualquier caso, pese a la vinculación aparente entre oído perfecto y lenguaje tonal, no podemos afirmar que se requiera un oído perfecto para aprenderlo, declara Patrick Wong, neurólogo de la Universidad del Noroeste. Si *ASPM* y *Microcephalin* desempeñan un papel importante en los lenguajes tonales, los genes podrían ayudar a escuchar los tonos altos y bajos, a incorporar un tono alto o bajo a las palabras y frases o a percibir los patrones de cambios de tono.

Ladd señala que los futuros estudios podrían centrarse en personas que se disponen a aprender idiomas tonales, para ver si alguna mutación de *ASPM* y *Microcephalin* está vinculada a su nivel de éxito. Aun cuando los genes desempeñasen una función en el tono y el lenguaje, sus efectos, prosigue, quizá serían muy sutiles y pasarían inadvertidos entre los múltiples factores relacionados con la educación de una persona.

—Charles Q. Choi



El fundamento físico del
CAMBIO CLIMATICO

William Collins, Robert Colman, James Haywood, Martin R. Manning y Philip W. Mote

¿Por qué están tan seguros los climatólogos de que la actividad humana provoca un calentamiento peligroso de la Tierra?

Algunos de los participantes en la reciente revisión internacional de los datos científicos pertinentes resumen aquí los argumentos y analizan las incertidumbres que quedan por despejar



Para quienes estudian el cambio climático, ¡qué raros son los momentos en que pueden exclamar "eureka"! Progresan mediante el penoso ensamblaje de los indicios que reporta cada nueva medición de temperaturas, exploración por satélite o experimento con modelos del clima. La información se comprueba y se vuelve a comprobar; las ideas se contrastan una y otra vez. ¿Se ajustan las observaciones a los cambios predichos? ¿No habrá otra explicación? Como cualquier científico que se precie, el climatólogo quiere asegurarse de que se apliquen los criterios más exigentes a cuanto se descubra en su campo.

Y así, a lo largo de los últimos veinte años, se han acumulado las pruebas —a medida que se multiplicaban los registros climatológicos, mejoraba nuestro conocimiento del sistema climático y aumentaba la fiabilidad de los modelos climatológicos— de que los seres humanos alteran el clima. La comunidad científica ha venido convenciéndose de la realidad del cambio climático reciente y de que en el futuro podrían suceder cambios aún mayores. Esta certidumbre se refleja en el último informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC), el cuarto de una serie de documentos, escritos y revisados por cientos de expertos de todo el mundo, que evalúan los conocimientos de que se dispone.

El Panel publicó en febrero una versión condensada de la primera parte del informe, que versaba sobre el fundamento físico del cambio climático. Con el título de "Resumen para responsables públicos", transmitía a éstos y a la ciudadanía en general un mensaje inequívoco: los científicos están más seguros que nunca de que los seres humanos han modificado el clima y de que va a seguir habiendo cambios climáticos causados por la acción humana. Aunque el informe considera que algunos de esos futuros cambios resultan ya inevitables, confirma también que el futuro, especialmente a largo plazo, sigue dependiendo de nosotros: la amplitud de los cambios tendrá que ver con lo que decidamos hacer con las emisiones de gases de efecto invernadero.

La evaluación de los fundamentos físicos se centra en cuatro temas: las causas del cambio climático, los cambios observados en el sistema climático, las relaciones de causa y efecto y la previsión de futuros cambios. Desde la evaluación realizada por el Panel en 2001, se han conseguido importantes avances en todas esas áreas. Iremos aquí exponiendo los principales hallazgos que documentan la amplitud del cambio climático y llevan necesariamente a la conclusión de que es la actividad humana la que lo está provocando.

Factores que impulsan el cambio climático

Debido a la acción humana, han aumentado las concentraciones atmosféricas de muchos gases, en particular el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los halocarburos (gases que en el pasado se usaban como refrigerantes y presurizadores de vaporizadores). Estas sustancias atrapan la energía térmica (el calor) dentro de la atmósfera mediante el efecto invernadero. Llevan así al calentamiento global.

Las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso permanecieron constantes, a grandes rasgos, durante casi 10.000 años, hasta que se produjeron los bruscos y cada vez más rápidos aumentos de los últimos 200 años (*véase el recuadro* "Factores que influyen en el clima"). Las tasas de crecimiento de las concentraciones de dióxido de carbono han sido superiores en los últimos 10 años a las de cualquier otra década desde que, a mediados del siglo XX, empezó a escrutarse la atmósfera de forma continua.

Conceptos básicos

- Los expertos consideran que el hombre ha perturbado el clima, una acción incesante que provocará mayores alteraciones.
- La causa principal de los cambios climáticos recientes estriba en las emisiones de gases de efecto invernadero, procedentes de la actividad humana, especialmente la quema de combustibles fósiles.
- El informe de 2007 del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático considera que la probabilidad de que el cambio climático se deba a la acción humana es del 90 por ciento. El informe anterior, publicado en el año 2001, consideraba que la probabilidad era de más de un 66 por ciento.
- Aunque ya es inevitable que se produzcan nuevos cambios en el clima global, especialmente a largo plazo, la magnitud de los cambios previstos dependerá de lo que el hombre decida hacer con las emisiones de gases de efecto invernadero.

TOM DRAPER DESIGN; *de izquierda a derecha:* JOHN McCONNICO *AP Photo;* JAAP HART *iStockPhoto;* ISTOCKPHOTO; MALCOLM ROMAIN *iStockPhoto;* TONY TREMBLAY *iStockPhoto;* ROB HILL *iStockPhoto*



VOCABULARIO

FORZAMIENTO RADIATIVO. Según se usa la expresión en el recuadro "Factores que influyen en el clima", se refiere al cambio en el equilibrio energético de la Tierra desde la época preindustrial hasta el momento actual.

COSTA DEL GOLFO, en 2005; daños por más de 100.000 millones de dólares en 1970; más de 300.000 muertos.

GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LARGA DURACION. Incluyen el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los halocarburos. Los aumentos observados de estos gases son el resultado de actividades humanas.

OZONO. Un gas que se encuentra en la atmósfera superior y a ras del suelo. A nivel del suelo es un contaminante. En la parte superior de la atmósfera, protege la vida terrestre de los perniciosos rayos ultravioleta del Sol.

ALBEDO SUPERFICIAL. La reflectividad de la superficie de la Tierra: una superficie más luminosa, como una capa de nieve, refleja más radiaciones solares que otra superficie más oscura.

AEROSOLES. Partículas presentes en el aire generadas por fuentes naturales (polvo, tormentas, incendios forestales, erupciones volcánicas) y artificiales, como la quema de combustibles fósiles.

ESTELAS. Nubes artificiales creadas por los gases de escape de los motores de los aviones.

TROPOSFERA. La capa de la atmósfera más cercana a la Tierra. Abarca desde el nivel del mar hasta unos 12 kilómetros de altitud.

ESTRATOSFERA. Se encuentra inmediatamente por encima de la troposfera y abarca unos 50 kilómetros por encima de ella.

Las concentraciones actuales se cifran en torno a un 35 por ciento superiores a las preindustriales (que pueden determinarse por las burbujas de aire atrapadas en las muestras de los glaciares). Los niveles de metano son unas dos veces y media más altos que los preindustriales, y los de óxido nitroso han aumentado en un 20 por ciento, más o menos.

¿Cómo podemos estar seguros de que los seres humanos somos responsables de estos incrementos? Algunos gases de efecto invernadero (como los halocarburos) no se producen en la naturaleza. En el caso de otros gases, hay dos datos importantes que demuestran la influencia humana. En primer lugar, las variaciones geográficas de la concentración revelan que las fuentes se encuentran principalmente en tierra y en el hemisferio norte, más densamente poblado. En segundo lugar, el análisis de isótopos, que puede distinguir las diferentes fuentes de emisiones, demuestra que el aumento del dióxido de carbono proviene, en su mayor parte, de la utilización de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). Los aumentos del metano y el óxido nitroso se derivan de las prácticas agrícolas y de los combustibles fósiles.

Los climatólogos recurren a la noción de forzamiento radiativo para cuantificar los efectos en el clima de esas concentraciones crecidas. El forzamiento radiativo es el cambio causado en el equilibrio global de energía de la Tierra con respecto a la época preindustrial (se suele expresar en watt por metro cuadrado). Un forzamiento positivo induce calentamiento; uno negativo, enfriamiento. Podemos determinar de forma bastante exacta el forzamiento radiativo asociado a los gases de efecto invernadero de larga duración, pues conocemos sus concentraciones atmosféricas, su distribución espacial y los principios físicos que regulan su interacción con la radiación.

El cambio climático no está provocado sólo por el aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero. Intervienen también otros mecanismos, naturales y antropogénicos. Entre las causas naturales se encuentran los cambios de la actividad solar y las grandes erupciones volcánicas. El informe expone varios mecanismos de forzamiento adicionales, y significativos, que hay que atribuir, igual que las emisiones de gases, al hombre (aerosoles —partículas microscópicas—, el ozono estratosférico y troposférico, la alteración del albedo superficial —la reflectividad— y las estelas de los aviones), si bien es mucho mayor la incertidumbre acerca de su influencia que en el caso de los gases de invernadero (*véase el recuadro* "Factores que influyen en el clima").

Existen dudas en torno a las consecuencias climáticas de la modificación del albedo de las nubes por los aerosoles generados por actividades humanas: sus complejas interacciones con las nubes aumentan el brillo de éstas, que reflejan entonces más luz solar hacia el espacio. Otra fuente de incertidumbre proviene del efecto directo de los aerosoles antropogénicos: como partículas, ¿en qué cuantía reflejan y absorben directamente la luz solar? En general, estos efectos de los aerosoles tienden a producir un enfriamiento que compensaría, en parte, el calentamiento debido a los gases de efecto invernadero de larga duración. Pero, ¿en qué medida? ¿Podrían llegar a neutralizar el calentamiento?

Uno de los avances habidos desde el informe del PICC de 2001 es la cuantificación, mediante la combinación de los resultados de multitud de modelos y observaciones, de la incertidumbre asociada a cada tipo de forzamiento. En consecuencia, ahora ya podemos evaluar el efecto humano total. Nuestra estimación más probable decuplica, *grosso modo*, la estimación más probable del forzamiento radiativo natural atribuible a los cambios de actividad solar.

Este grado más alto de certeza de un forzamiento radiativo neto positivo se adecua muy bien a los datos experimentales del calentamiento que analizaremos a continuación. Cabe

TOM DRAPER DESIGN; ISTOCKPHOTO; MIGUEL ANGELO SILVA *iStockPhoto*; DLILLC *Corbis*; EMILY HARRISON; DAVID WOODS *iStockPhoto*; BEN CONLAN *iStockPhoto*; BETTMANN/CORBIS; ANNA PUSTOVAYA *iStockPhoto*; NOAA; ISTOCKPHOTO; HEIKO BENNEWITZ *iStockPhoto*



imaginar los forzamientos como un tira y afloja donde los de signo positivo llevan a la Tierra hacia un clima más cálido y los de signo negativo hacia un estado más frío. Ahora que conocemos la fuerza de los competidores mucho mejor que antes, sabemos que hay un ganador, y con gran ventaja: la Tierra se está viendo arrastrada hacia un clima más cálido, proceso que cobrará mayor intensidad conforme vaya aumentando el calentamiento por efecto invernadero.

Cambios climáticos observados

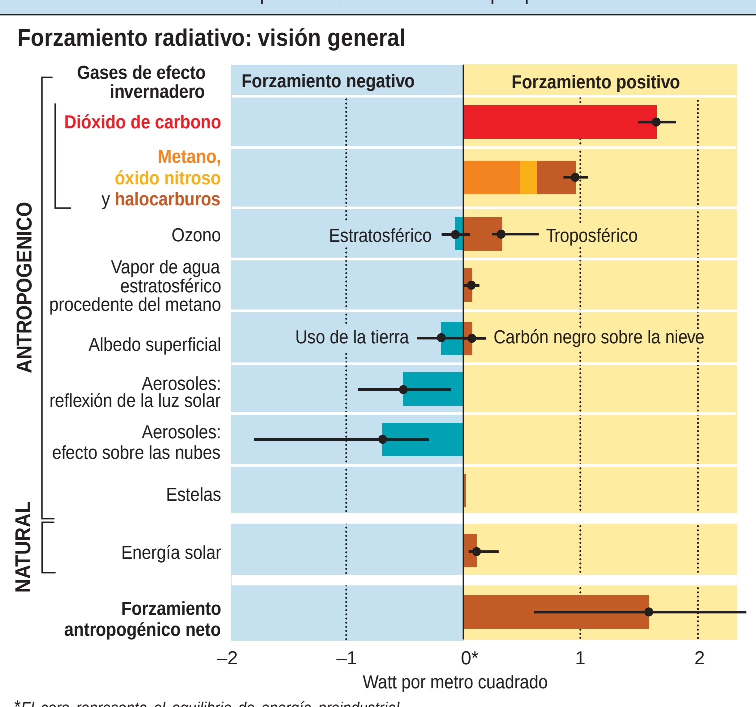
Los numerosos datos experimentales, depurados, entonces disponibles para el informe PICC 2007 permitieron una evaluación más general de los cambios que en informes anteriores. Los registros experimentales indican que 11 de los 12 últimos años son los más cálidos desde que hay datos fiables, es decir, desde 1850 más o menos. La probabilidad de que esos años más cálidos sean consecutivos por pura casualidad es pequeñísima. Los cambios de cantidades importantes —la temperatura global, el nivel del mar y la capa de nieve en el hemisferio norte (*véase el recuadro* "Datos experimentales")— muestran en todos los casos indicios de calentamiento, aunque difieren los detalles.

La anterior evaluación del PICC estimaba una tendencia hacia el calentamiento de 0,6 ± 0,2 grados centígrados en el período de 1901 a 2000. Debido al calentamiento reciente más acentuado, la tendencia actualizada entre 1906 y 2005 es ahora de 0,74 ± 0,18 grados centígrados. Hay que tener en cuenta que sólo el calentamiento entre 1956 y 2005 es ya de 0,65 ± 0,15 grados centígrados, lo que implica que la mayor parte del calentamiento del siglo XX se produjo en los últimos 50 años. Por supuesto, el clima sigue variando en torno a las medias incrementadas; los extremos han cambiado de acuerdo con el cambio de esas medias: los días con mínimas debajo de cero grados y los días y noches de frío se han hecho menos comunes, mientras que

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CLIMA

Un tira y afloja entre los forzamientos positivos (influencias que provocan el calentamiento climático) y los forzamientos negativos (que provocan el enfriamiento) resulta en una "victoria" rotunda de los forzamientos inducidos por la actividad humana que provocan calentamiento (*gráfico de la izquierda*). Los forzamientos dominantes inducidos por la actividad humana provienen de los gases de efecto invernadero de larga vida presentes en la atmósfera, cuyas concentraciones han aumentado mucho en los últimos 200 años.

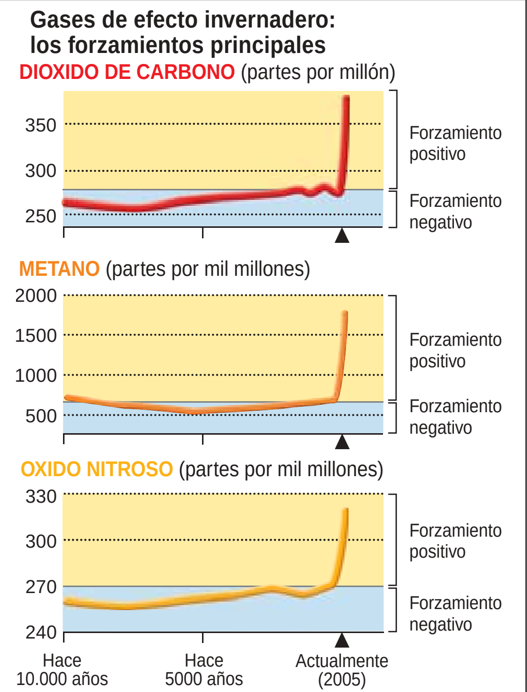
Forzamiento radiativo: visión general



**El cero representa el equilibrio de energía preindustrial.*

Se muestran las estimaciones para 2005 de las medias globales del forzamiento radiativo atribuible a los principales mecanismos. Las barras negras de error indican el nivel de incertidumbre asociado a cada forzamiento: existe una probabilidad del 90 por ciento de que los valores caigan dentro de las barras de error. El forzamiento radiativo de los gases de efecto invernadero, por ejemplo, tiene un alto grado de certeza, mientras que hay una gran incertidumbre asociada a los efectos de los aerosoles. (Los aerosoles volcánicos no se incluyen en el gráfico, debido a su condición de acontecimientos esporádicos.)

Gases de efecto invernadero: los forzamientos principales



Las concentraciones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso del pasado se dedujeron del hielo de los glaciares; las de tiempos recientes vienen de muestras atmosféricas. Los grandes aumentos recientes pueden atribuirse a las actividades humanas.

DANIELA NAOMI MOLNAR (*gráficas*)





Hielo marino en el Artico, 1979



Hielo marino en el Artico, 2005

las olas de calor y los días y noches cálidos menudean más.

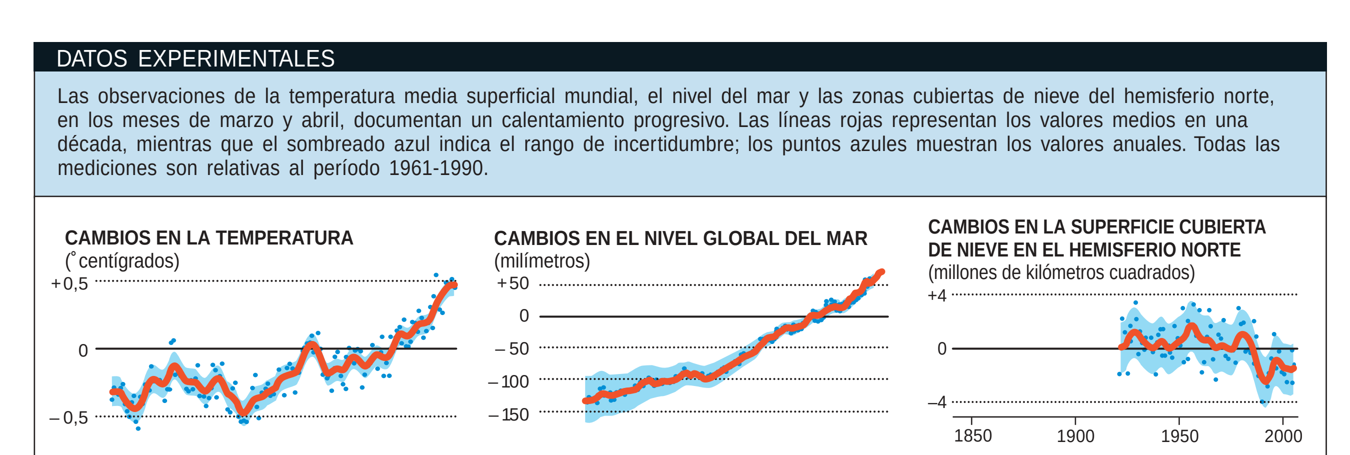
Entre las propiedades del sistema climático estudiadas no sólo se incluyen conceptos familiares, como las medias de temperatura o de precipitaciones, sino también el estado del océano y la criosfera (mares de hielo, grandes placas de hielo en Groenlandia y en el continente antártico, glaciares, nieve, subsuelos helados y hielo de lagos y ríos). Las interacciones complejas entre distintas partes del sistema climático constituyen un elemento fundamental del cambio climático. Por mor de ejemplo, la reducción del hielo marino aumenta la absorción de calor por parte de los océanos y el flujo de calor entre los océanos y la atmósfera, lo que repercute en la nubosidad y las precipitaciones.

Un gran número de observaciones adicionales concuerdan, a grandes rasgos, con el calentamiento observado y reflejan un flujo de calor desde la atmósfera hacia otros componentes del sistema climático. La capa de nieve primaveral, que disminuye a medida que aumentan las temperaturas vernales en las latitudes medias del hemisferio norte, decreció bruscamente en torno a 1988 y ha permanecido en un nivel muy bajo desde entonces. Esta disminución es preocupante, porque la capa de nieve cuenta mucho en la humedad del suelo y los recursos hídricos de vastas zonas de la Tierra.

En los mares se perciben tendencias al calentamiento inequívocas, que disminuyen con la profundidad, según cabía esperar. Estos cambios indican que los océanos han absorbido más del 80 por ciento del calor añadido al sistema climático. Vemos ahí una causa principal del aumento del nivel del mar. El nivel del mar sube porque su agua se expande al calentarse y porque el agua de los glaciares y placas de hielo que se funden se añade a los océanos.

Desde 1993, las observaciones de los satélites han permitido cálculos más precisos del aumento del nivel del mar, que actualmente se estima en 3,1 ± 0,7 milímetros al año desde 1993 hasta 2003. Decenios pasados mostraron crecimientos igualmente rápidos, de modo que se necesitarán datos tomados por satélites a lo largo de períodos más prolongados para determinar de forma inequívoca si se está acelerando el aumento del nivel del mar. En las últimas décadas se han observado reducciones sustanciales de la extensión del hielo del mar Artico (desde 1978, 2,7 ± 0,6 por ciento por década de media anual, 7,4 ± 2,4 por ciento por década para el verano), aumentos de las temperaturas de los subsuelos permanentemente helados (el *permafrost*) y reducciones de la extensión de las capas de hielo en todo el mundo, en particular en Groenlandia y en el continente antártico. Desgraciadamente, no hubo una medición adecuada de tales magnitudes hasta los últimos decenios; los puntos iniciales de los registros correspondientes no coinciden.

Los cambios hidrológicos concuerdan también, a grandes rasgos, con el calentamiento global. El vapor de agua es el gas de efecto invernadero más potente. A diferencia de otros gases de efecto invernadero, depende principalmente de la temperatura. Su concentración en la atmósfera ha aumentado desde los años ochenta, por lo menos. Aunque las precipita-



DATOS EXPERIMENTALES

Las observaciones de la temperatura media superficial mundial, el nivel del mar y las zonas cubiertas de nieve del hemisferio norte, en los meses de marzo y abril, documentan un calentamiento progresivo. Las líneas rojas representan los valores medios en una década, mientras que el sombreado azul indica el rango de incertidumbre; los puntos azules muestran los valores anuales. Todas las mediciones son relativas al período 1961-1990.



ciones son muy variables a pequeña escala, puede establecerse que han aumentado en grandes regiones del mundo: parte oriental de Norteamérica y Sudamérica, parte septentrional de Europa y Asia central y del norte. Se ha observado, en cambio, un desecamiento del Sahel, del Mediterráneo, del sur de Africa y de algunas zonas de Asia meridional.

La salinidad de los océanos vale como pluviómetro poderoso. Las aguas cercanas a la superficie de los océanos se han hecho más dulces en latitudes altas y medias, mientras que en las latitudes inferiores se han vuelto más saladas, de acuerdo con las modificaciones de los patrones a gran escala de las precipitaciones.

Las reconstrucciones de las condiciones climatológicas del pasado —el paleoclima— a partir de los anillos de los árboles y de otros indicios proporcionan un conocimiento adicional importante de la forma en que funciona el sistema climático con y sin la influencia del hombre. Estas reconstrucciones indican que el calentamiento del último medio siglo no es habitual, al menos cuando se compara ese lapso con los últimos 1300 años. El período más caluroso entre los años 700 y 1950 de nuestra era —probablemente el transcurrido entre 950 y 1100— fue varias décimas de grado centígrado más frío que las temperaturas medias entre 1980 y hoy.

Atribución del cambio climático observado

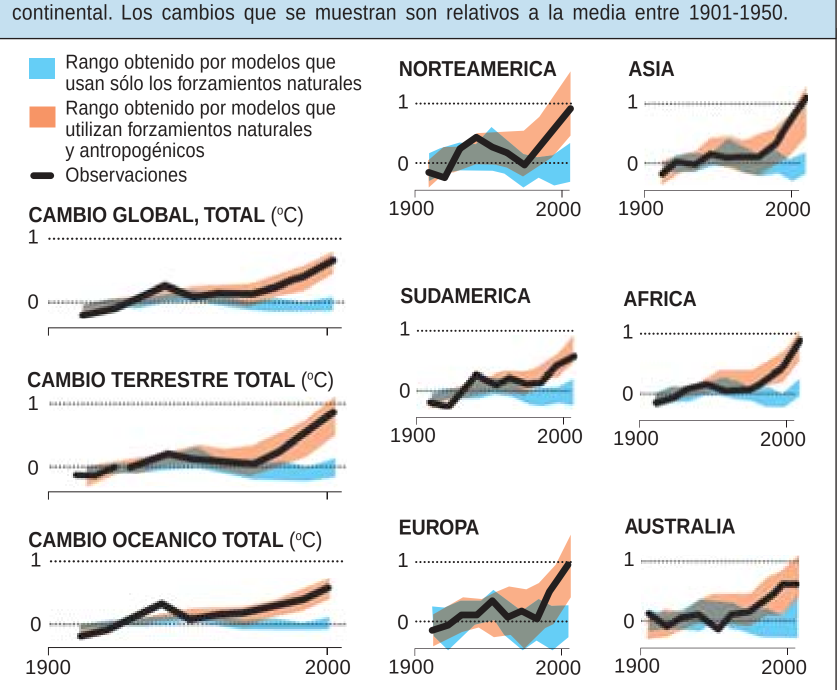
Pese a la fundada certidumbre que se tiene de que las actividades humanas aportan un forzamiento radiativo positivo y de que el clima ha cambiado, ¿podemos vincular ambas cuestiones? Hay que dirimir a qué se atribuye lo que se ve: ¿son responsables principales de los cambios climáticos observados las actividades humanas? ¿No habrá otras causas, como algún forzamiento natural o, simplemente, la variación espontánea del sistema climático? El informe de 2001 del PICC llegó a la conclusión de que era *probable* (con más de un 66 por ciento de probabilidad) que la mayor parte del calentamiento desde mediados del siglo XX fuera atribuible al hombre. El informe de 2007 va significativamente más allá, aumentando el grado de certeza a *muy probable* (más de un 90 por ciento de probabilidad).

La razón de esa mayor certeza proviene de una multitud de avances. De entrada, contamos con cinco años más de datos procedentes de la observación; el aumento global de la temperatura durante ese período se ha ajustado, en líneas generales, a las previsiones del calentamiento provocado por los gases de efecto invernadero incluidas en los informes que el PICC ha ido publicando desde 1990. Además, se han tomado en consideración los cambios de otros aspectos del clima, como la circulación atmosférica o las temperaturas en el interior de los océanos. Se ha confeccionado así un cuadro coherente, y más amplio, de la intervención humana. Se han refinado los modelos climáticos, esenciales a la hora de atribuir causas; ahora representan el clima actual y el del pasado reciente con una precisión considerable. Por último, algunas discrepancias de importancia en los datos experimentales se han ido despejando en buena medida en los cinco años transcurridos desde el penúltimo informe.

La más importante de esas discrepancias era una diferencia entre el registro instrumental de las temperaturas superficiales (que mostraba un calentamiento significativo en las últimas décadas, en consonancia con el impacto de las actividades humanas) y el registro de los datos de los globos y satélites atmosféricos (que mostraban escasos indicios del calentamiento previsto). Varios nuevos estudios de los datos de globos y satélites han resuelto esta anomalía; ahora se aprecia un calentamiento general en la superficie y en la atmósfera.

CAMBIO DE TEMPERATURA PROVOCADO POR LOS SERES HUMANOS

Los modelos que utilizan solamente forzamientos naturales (*azules*) no reflejan los incrementos actuales de la temperatura. Sin embargo, cuando se tienen en cuenta los forzamientos naturales y los provocados por el hombre (*naranjas*), los modelos reproducen la subida real de la temperatura, tanto a escala mundial como a escala continental. Los cambios que se muestran son relativos a la media entre 1901-1950.



LUCY READING-IKKANDA (*gráficas*)

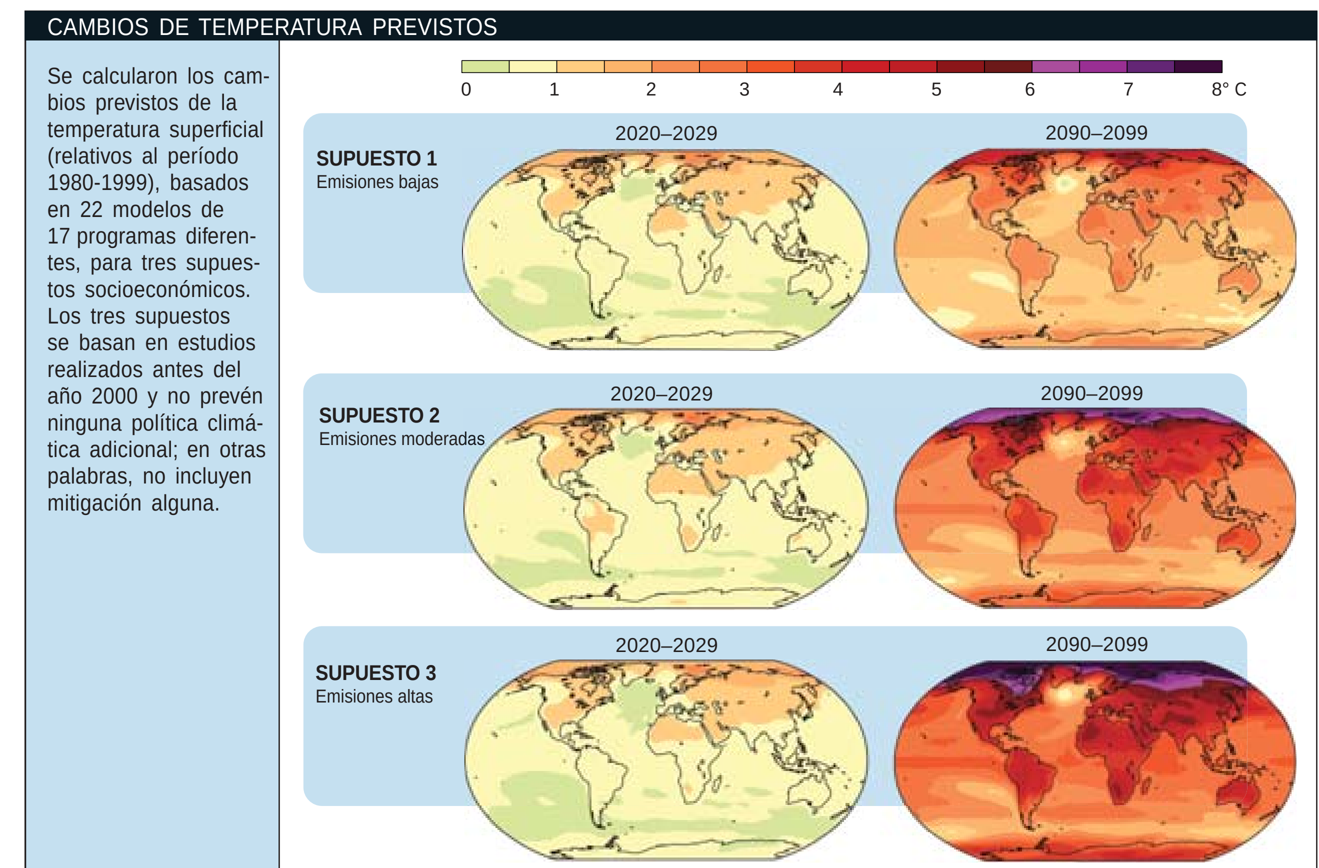
No habría mejor manera de estudiar las causas del cambio climático que repetir en el mundo real la historia del clima del siglo XX, pero con una concentración constante (en lugar de creciente) de gases de efecto invernadero. Por supuesto, es un experimento imposible. De ahí que se haya elegido la segunda mejor opción: simular el pasado con modelos climáticos.

Dos avances reseñables desde la última evaluación del PICC han aumentado la confianza en el uso de modelos tanto para la atribución de causas como para la previsión de cambios climáticos. Se refiere el primero a la realización de un conjunto exhaustivo, estrechamente coordinado, de simulaciones de la evolución histórica y futura del clima terrestre por 18 grupos, de diversos países, que confeccionan modelos. Usar muchos modelos ayuda a cuantificar el efecto de las incertidumbres acerca de diversos procesos climáticos en los abanicos de resultados de los modelos. Aunque algunos procesos se entienden bien y se representan adecuadamente mediante ecuaciones (el flujo de la atmósfera y del océano o la propagación de la luz solar y del calor, por ejemplo), ciertos componentes esenciales del sistema climático, como las nubes, los remolinos marinos y la transpiración de los vegetales, se conocen peor.

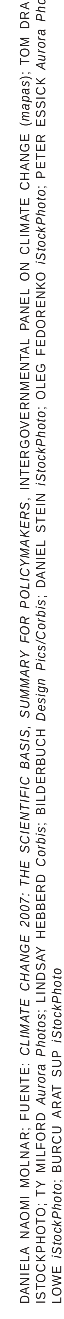
Los creadores de modelos efectúan aproximaciones de los componentes mal conocidos mediante representaciones simplificadas, las llamadas parametrizaciones. El deseo de establecer cómo afectan tales incertidumbres a la atribución de causas y predicción del cambio climático es la principal razón de que se recurra a un conjunto de múltiples modelos para las evaluaciones del PICC. El conjunto de modelos utilizado para la última evaluación descuella por el abultado número de modelos y de experimentos realizados.

El segundo avance consiste en la incorporación de representaciones más realistas de ciertos procesos climáticos en los modelos: del comportamiento de los aerosoles atmosféricos, de la dinámica (el movimiento) del hielo marino, del intercambio de agua y energía entre la tierra y la atmósfera. Un número mayor de modelos incluye ahora los principales tipos de aerosoles y las interacciones entre aerosoles y nubes.

Cuando se utilizan los modelos climáticos para atribuir causas, primero se realizan simulaciones mediante modelos que sólo tienen en cuenta las influencias “naturales” sobre el clima de los últimos 100 años; por ejemplo, los cambios en la irradiación solar y las principales erupciones volcánicas. Después, se utilizan modelos que incluyen los aumentos inducidos por el hombre en



Se calcularon los cambios previstos de la temperatura superficial (relativos al período 1980-1999), basados en 22 modelos de 17 programas diferentes, para tres supuestos socioeconómicos. Los tres supuestos se basan en estudios realizados antes del año 2000 y no prevén ninguna política climática adicional; en otras palabras, no incluyen mitigación alguna.





los niveles de gases de efecto invernadero y de aerosoles. Los resultados son sorprendentes. Los modelos que sólo comprenden los forzamientos naturales son incapaces de explicar el calentamiento global observado desde mediados del siglo XX; en cambio, lo logran cuando, además de los factores naturales, incluyen los antropogénicos. Los patrones a gran escala de los cambios de temperatura de los distintos modelos son también más congruentes entre sí cuando se incluyen todos los forzamientos.

Dos pautas señalan con claridad la influencia humana. La primera consiste en que el calentamiento sea mayor sobre el continente que sobre el océano y mayor en la superficie del mar que en las capas profundas. Este patrón se ajusta bien a un calentamiento, inducido por gases de efecto invernadero, por efecto de la atmósfera suprayacente: el agua se calienta más despacio a causa de su elevada inercia térmica. El calentamiento indica también que los océanos están absorbiendo una gran cantidad de calor; se demuestra así que el balance energético del planeta se ha desequilibrado.

La segunda pauta consiste en que la troposfera (la parte inferior de la atmósfera) se ha calentado, mientras que la estratosfera, justo encima de ella, se ha enfriado. Si los cambios solares fueran la causa dominante del forzamiento, ambas capas atmosféricas deberían calentarse. Sin embargo, el contraste observado es el que se esperaría de la combinación del aumento de los gases de efecto invernadero con la disminución del ozono estratosférico.

En estos datos generales, sometidos a cuidadosos análisis estadísticos, se fundamenta esa mayor certidumbre que ahora se tiene en que es la acción humana lo que está provocando el calentamiento global observado. La hipótesis de que los rayos cósmicos podrían afectar a las nubes y, por lo tanto, al clima, se basaba en correlaciones sacadas de registros históricos limitados que, contrastadas con datos adicionales, no se han mantenido en pie. Además, el mecanismo físico se sigue moviendo en el terreno de la especulación.

¿Qué sucede a escalas más pequeñas? Conforme van decreciendo las escalas espacial y temporal, la atribución del cambio climático resulta más difícil: las variaciones naturales de las temperaturas a pequeña escala no están tan promediadas y, por lo tanto, enmascaran con mayor facilidad las señales del cambio. Sin embargo, con un calentamiento continuo la señal acaba también por aflorar a pequeña escala. El informe sostiene que la actividad humana ha influido probablemente en la temperatura incluso a escala continental y, además, en todos los continentes, excepto en la Antártida.

Las influencias humanas se perciben, asimismo, en sucesos extremos; tales, las noches inusualmente calurosas o frías y la aparición de olas de calor. Por supuesto, eso no significa que cada suceso extremo (como la ola de calor europea del año 2003) tenga por "causa" exclusiva el cambio climático inducido por el hombre. Los sucesos extremos, siempre complejos, obedecen a múltiples causas. Pero sí significa que la acción humana hubo de alterar las *probabilidades* de que se produzcan.

Previsiones de futuros cambios climáticos

¿Qué derrota seguirá el clima a lo largo del siglo XXI? Se intenta responder a cuestión tan crucial a través de simulaciones con modelos climáticos que se basan en previsiones de las emisiones futuras de aerosoles y gases de efecto invernadero. Según las simulaciones, con emisiones de gases de efecto invernadero similares o superiores a las actuales los cambios climáticos serán, muy probablemente, superiores a los ya observados durante el siglo XX. Aun cuando las emisiones se redujesen, de forma inmediata y lo suficiente como para estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en los niveles actuales, el cambio climático seguiría produciéndose durante siglos. Semejante inercia del clima es consecuencia de una combinación de factores, entre ellos la capacidad calorífica de los océanos y los milenios necesarios para que la circulación mezcle el calor y el dióxido de carbono en sus profundidades hasta que se alcance el equilibrio.

En concreto, los modelos prevén que, en los próximos 20 años, para una gama de emisiones verosímiles,

LA FORMA DE ACTUAR DEL PICC

El PICC fue creado por los gobiernos en 1988 para que llevase a cabo evaluaciones de la información científica y técnica disponible sobre el cambio climático. Se espera que el procedimiento utilizado para la elaboración de estas evaluaciones les asegure un alto nivel de credibilidad.

Se han publicado evaluaciones muy completas en 1990, 1995, 2001 y 2007.

Tres "grupos de trabajo" separados examinan los fundamentos físicos del cambio climático, sus efectos sobre la naturaleza y la sociedad y los métodos para mitigarlo.

Los gobiernos nombran a los autores principales entre quienes llevan a cabo investigaciones pertinentes. Se intenta equilibrar cuidadosamente los distintos puntos de vista, así como la geografía, el sexo y la edad.

Un procedimiento de revisión contrasta las evaluaciones de los autores con las opiniones de los demás expertos. Más de 600 expertos revisaron el informe del Grupo de Trabajo I, en el que está basado este artículo. Aportaron más de 30.000 comentarios.

Cada uno de los tres grupos de trabajo emite también un "Resumen para Políticos", redactado en colaboración con los delegados de los gobiernos, para asegurar que el lenguaje utilizado resulte claro para los responsables públicos.

ANTE EL FUTURO: compilación elaborada por los editores

LAS CONSECUENCIAS DEL AVANCE DEL CALENTAMIENTO

El calentamiento global es real y, tal como afirmó el Grupo de Trabajo I del PICC en su informe de enero-febrero de 2007, parece "muy probable" que se deba, en buena medida, a la acción del hombre del último medio siglo, como mínimo. Pero, ¿tan importante es ese calentamiento como para plantear un verdadero problema? De responder a la pregunta se encargó el Grupo de Trabajo II, un equipo internacional de científicos que se centraron en la vulnerabilidad de los entornos naturales y humanos al cambio climático.

En el resumen de sus conclusiones de abril de 2007, el Grupo de Trabajo II determinó que el calentamiento inducido por el hombre en las tres últimas décadas y media ha tenido una influencia discernible en muchos sistemas físicos y biológicos. Los datos experimentales de todos los continentes y de la mayoría de los océanos muestran que muchos sistemas naturales sufren los cambios climáticos regionales, especialmente por la subida de la temperatura. Los subsuelos permanentemente congelados se está haciendo cada vez más inestables, las avalanchas rocosas de las zonas de montaña abundan cada vez más, las hojas de los árboles brotan antes y algunos animales y plantas se están desplazando hacia latitudes o altitudes superiores.

Mirando hacia el futuro, el grupo predijo también que los cambios climáticos que se están produciendo afectarían a la salud y al bienestar de millones de personas en todo el mundo. La gravedad de los efectos dependerá del nivel de calentamiento que se produzca. Entre las consecuencias más probables se encuentran las siguientes:

- Olas de calor, sequías, incendios, inundaciones costeras y tormentas más frecuentes harán que aumente el número de muertes, lesiones y enfermedades asociadas a esas situaciones.
- Algunas enfermedades infecciosas, como la malaria, se extenderán a nuevas regiones.
- Las altas concentraciones de ozono al nivel del suelo agravarán las dolencias cardiacas y respiratorias.
- En torno al año 2080, el aumento del nivel del mar inundará las casas y propiedades de millones de personas, especialmente en los grandes deltas de Asia y Africa y en las islas pequeñas.

Los efectos nocivos de estos cambios serán más graves para las poblaciones pobres, que suelen depender en mayor grado de recursos sensibles al clima, como el agua y la comida locales y cuya capacidad de adaptación, por definición, está económicamente limitada.

Los efectos del calentamiento global no serían universalmente negativos, sobre todo en los próximos decenios. Por ejemplo, si bien temperaturas más altas perjudicarían bastante pronto la producción de cereales importantes en las naciones ecuatoriales, durante un tiempo aumentarían también la productividad en los países de latitudes altas o medias, como los Estados Unidos. Sin embargo, una vez que la subida de la temperatura superase los tres grados centígrados, se produciría un declive de la agricultura también en esas zonas, a no ser que se acometieran adaptaciones generalizadas.

América Central y Meridional

- Sustitución gradual de las selvas tropicales por sabana en la Amazonia oriental
- Sustitución de la vegetación semiárida por vegetación de tierras áridas
- Extinciones de especies en muchas áreas tropicales
- Reducción de la disponibilidad del agua
- Pérdida de tierras de cultivo en áreas más secas
- Disminución del rendimiento de algunas cosechas importantes
- Reducción de la productividad del ganado

LO QUE HAY QUE HACER

El hombre tiene dos formas de reaccionar ante el cambio climático: mediante la adaptación y mediante la mitigación. La adaptación implica aprender a sobrevivir y prosperar en un mundo más cálido. La mitigación implica limitar la amplitud del calentamiento futuro, reduciendo la liberación neta de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Dado que las temperaturas crecientes están a la orden del día y que un incremento ilimitado resultaría insoportable, será esencial combinar la adaptación y la mitigación. Desgraciadamente, los desacuerdos sobre la factibilidad, los costes y la necesidad de la mitigación han retrasado hasta ahora la respuesta mundial.

A la hora de determinar estrategias de mitigación, con sus costes, el Grupo de Trabajo III del PICC tuvo en cuenta en su informe de 2007 varias estimaciones de la expansión económica, el crecimiento demográfico y la quema de combustibles fósiles. Para los seis supuestos resultantes se predicen concentraciones atmosféricas de equivalentes de dióxido de carbono (es decir, dando las concentraciones de aerosoles y gases de efecto invernadero por medio de las de dióxido de carbono que producirían el mismo efecto) que van de 445 partes por millón (ppm) a 1130 ppm, con los correspondientes aumentos de la temperatura de entre 2,0 y 6,1 grados centígrados por encima de los niveles preindustriales. Para que el aumento de la temperatura no sobrepase la previsión más baja de las mencionadas, el grupo estima que el mundo debería estabilizar los gases atmosféricos de efecto invernadero en 445 ppm en el año 2015 (las concentraciones actuales se acercan a 400 ppm). Se cree que cualquier temperatura superior podría desencadenar graves inundaciones en unos lugares y graves sequías en otros, hacer desaparecer especies enteras y crear el caos económico.

El informe del grupo estudia con detalle las técnicas y las políticas más prometedoras para mantener los gases en 445 ppm. Subraya la importancia de mejorar la eficacia energética de los edificios y vehículos, el cambio a las energías renovables y la conservación de los bosques como "sumideros para el dióxido de carbono". Las políticas incluyen el establecimiento de un objetivo para las emisiones globales y límites, impuestos, incentivos y derechos de emisión negociables.

Sin embargo, los científicos del PICC realizaron su evaluación antes de la aparición, el pasado abril, en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA,* de un artículo que sostiene que las emisiones mundiales de dióxido de carbono entre los años 2000 y 2004 aumentaron tres veces más rápido que en la década de los noventa: han pasado de crecer a un 1,1 por ciento anual a hacerlo a un 3,2. En otras palabras, las emisiones globales reales han crecido desde el año 2000 con una celeridad superior a la prevista en los peores supuestos del PICC. La situación sería, pues, incluso más grave que en las sombrías previsiones de las evaluaciones del Panel.

DANIELA NAOMI MOLNAR (*mapa*); FUERTE: UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (UCA) Y IPCC

Una visión regional

Las listas incluidas indican algunos de los efectos perturbadores, además de los enumerados en la página anterior, que el Grupo de Trabajo II prevé que se van a producir en varias partes del mundo en el próximo siglo. El grupo asigna a la mayoría de estas predicciones una probabilidad alta o muy alta. Pueden encontrarse más detalles en www.ucar.edu/news/features/climatechange/regionalimpacts.jsp y en la página web del PICC (www.ipcc.ch).

Norteamérica

- En las montañas occidentales, una menor cantidad de nieve, más inundaciones invernales y reducción de los flujos veraniegos
- Ampliación del período de grandes riesgos de incendios y crecimiento de las áreas quemadas
- Aumento de la intensidad, duración y número de las olas de calor en ciudades que históricamente sean susceptibles a las mismas
- En las áreas costeras, aumento de la presión sobre personas y propiedades, a medida que el clima interaccione con el desarrollo y la polución

Europa

- Aumento del riesgo de inundaciones repentinas tierra adentro
- En el sur, más olas de calor con efectos dañinos para la salud, incendios más frecuentes, menor disponibilidad del agua y disminución del potencial hidroeléctrico, cosechas amenazadas y reducción del turismo veraniego
- En las áreas central y oriental, más olas de calor peligrosas para la salud e incendios de turberas, y una reducción de las precipitaciones en verano y de la productividad de los bosques
- En el norte, los efectos negativos a la larga sobrepasarán a los efectos beneficiosos iniciales (una disminución de la demanda de calefacción y un aumento de la productividad agrícola y del crecimiento forestal)

Asia

- Aumento de las inundaciones, avalanchas rocosas y perturbación de los recursos hídricos a medida que se vayan derritiendo los glaciares del Himalaya
- Riesgo continuado de hambrunas en varias regiones en desarrollo, debido a la disminución de la productividad de las cosechas, en combinación con el rápido crecimiento demográfico y la urbanización

Australia y Nueva Zelanda

- Aumento de los problemas del suministro de agua en el sur y el este de Australia y en partes de Nueva Zelanda hacia el año 2030
- Nuevas pérdidas de biodiversidad en lugares ecológicamente ricos hacia 2020
- Aumento de la intensidad y la frecuencia de las tormentas en varios lugares

Islas de pequeño tamaño

- Infraestructuras, establecimientos y asentamientos de importancia vital estarán amenazados por el aumento del nivel del mar
- Disminución de los recursos hídricos en muchos lugares para mediados de siglo
- Erosión de las playas, descoloramiento del coral y otros deterioros del estado de las costas, que perjudicarán a la pesca y al turismo
- Invasión por especies no autóctonas, especialmente en las islas de latitudes medias y altas

Regiones polares

- Los glaciares y las capas de hielo perderán grosor y extensión
- Cambios en la extensión del hielo marino del Artico y de los subsuelos permanentemente congelados
- Deshielo estacional más profundo de los subsuelos permanentemente congelados

Africa

- Disminución de la disponibilidad del agua hacia 2020 para 75–250 millones de personas
- Pérdida de tierras cultivables, reducción de las estaciones de crecimiento y reducción de la productividad en algunas áreas
- Disminución de las poblaciones de peces en los grandes lagos

la temperatura global aumentará a una tasa media de unos 0,2 grados centígrados por década, cerca de la tasa observada en los últimos 30 años. Aproximadamente la mitad de este calentamiento a corto plazo corresponde a la "promesa" de futuros cambios climáticos, consecuencia de la inercia con que el sistema climático reacciona a las concentraciones atmosféricas actuales de gases de efecto invernadero.

Por el contrario, el calentamiento a largo plazo, durante el siglo XXI, dependerá de manera muy especial de la futura tasa de emisiones. Las previsiones cubren una amplia variedad de situaciones, de un crecimiento económico muy rápido a un crecimiento modesto, y de una mayor a una menor dependencia de los combustibles fósiles. Las estimaciones más probables del aumento de las temperaturas globales van de los 1,8 a los 4,0 grados centígrados según la evolución de las emisiones, siendo las emisiones más altas las que provocan las temperaturas superiores. En cuanto a los efectos regionales, las previsiones indican con mayor certidumbre que nunca se asemejarán a los patrones de cambio observados en los últimos 50 años (mayor calentamiento sobre los continentes que sobre los océanos, por ejemplo), pero con cambios de una magnitud mayor.

Las simulaciones indican también que la eliminación del exceso de dióxido de carbono de la atmósfera mediante procesos naturales en los continentes y en los océanos perderá eficiencia con el calentamiento progresivo del planeta. Merma que hará que un porcentaje más alto del dióxido de carbono emitido permanezca en la atmósfera, lo cual, a su vez, acelerará el calentamiento global. Se trata de una importante realimentación del ciclo del carbono (el intercambio de compuestos de carbono a través del sistema climático). Aunque los modelos coinciden en que el ciclo del carbono representa una realimentación positiva, el abanico de sus resultados sigue siendo muy amplio, ya que dependen, entre otras cosas, de los cambios que la vegetación o la absorción edáfica de carbono experimenten a medida que se calienta el clima, sobre lo cual se sabe aún poco. Una parte importante de las investigaciones abiertas se proponen disipar esa ignorancia.

Los modelos predicen también que el cambio climático afectará a las características físicas y químicas de los océanos. Las estimaciones del aumento del nivel del mar durante el siglo XXI van desde los 30 a los 40 centímetros, dependiendo de nuevo de las emisiones. Más de un 60 por ciento de este aumento obedecerá a la expansión térmica del océano. Sin embargo, esas evaluaciones basadas en modelos no tienen en cuenta la posible aceleración recientemente observada de la pérdida de hielo de las capas de Groenlandia y del continente antártico. Aunque el conocimiento científico de dichos efectos es muy limitado, parece que podrían añadir de 10 a 20 centímetros adicionales al aumento del nivel del mar, y no se pueden excluir aumentos significativamente mayores. También se verá afectada la química del mar, ya que el aumento de la concentración de dióxido de carbono atmosférico incrementará la acidez de los océanos.

Se prevé que algunos de los cambios principales afectarán a las regiones polares: habrá subidas notables de la temperatura terrestre en altas latitudes y aumentará la profundidad del deshielo de los subsuelos permanentemente helados; menguará la extensión del hielo marino veraniego en la cuenca ártica. Las latitudes más bajas experimentarán, probablemente, un mayor número de olas de calor, precipitaciones más copiosas y huracanes y tifones más fuertes (aunque quizá menos frecuentes). No está claro en qué medida se intensificarán los huracanes y tifones. Para elucidarlo se están emprendiendo nuevas investigaciones.

Cuestiones pendientes

Persisten incertidumbres importantes. Desconocemos el modo preciso en que responderán las nubes a medida que aumenten las temperaturas, que será uno de los factores esenciales que determinará la magnitud general del calentamiento. Sin embargo, la complejidad de las nubes ha frustrado los intentos de precisar cómo responderán al calentamiento; también aquí hay que investigar más.

Vivimos en una época en que tanto los seres humanos como la naturaleza moldearán la futura evolución de la Tierra y sus habitantes. Desgraciadamente, la bola de cristal de nuestros modelos climáticos se vuelve más borrosa para las predicciones a más de un siglo de distancia. Nuestro conocimiento limitado de la reacción de los sistemas naturales y de la sociedad humana a los crecientes efectos del cambio climático aumenta nuestra incertidumbre aún más. En cualquier caso, un resultado del calentamiento global está fuera de duda: las plantas, los animales y los seres humanos vivirán con las consecuencias del cambio climático durante al menos los próximos mil años.

Los autores

William Collins, Robert Colman, James Haywood, Martin R. Manning y Philip W. Mote participaron en el Grupo de Trabajo I de la evaluación de 2007 del PICC. Collins es profesor del departamento de ciencias planetarias y de la Tierra en la Universidad de California en Berkeley e investigador del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley y del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Boulder, Colorado. Colman es investigador del Grupo de Dinámica Climatológica del Centro de Investigación de la Oficina Australiana de Meteorología, en Melbourne. Haywood es el jefe de investigación sobre aerosoles del Grupo de Investigación Basada en la Observación y del Grupo de Ecosistemas, Clima y Química de la Oficina Meteorológica de Exeter. Manning dirige la Unidad de Apoyo del Grupo de Trabajo I del PICC en el Laboratorio de Investigación de Sistemas Terrestres NOAA, en Boulder, Colorado, y Mote, climatólogo del estado de Washington, se halla adscrito al Grupo de Impactos Climáticos de la Universidad de Washington, en cuyo departamento de ciencias atmosféricas enseña.

Bibliografía complementaria

Todos los informes y resúmenes del PICC están disponibles en www.ipcc.ch

Considerados antaño meros tics nerviosos, ciertos movimientos inconscientes de los ojos son en buena medida responsables de nuestra capacidad de ver. Estos movimientos minúsculos podrían incluso revelar pensamientos subliminales

Susana Martinez-Conde y Stephen L. Macknik

Las ventanas de la

Conceptos básicos

- Cuando los ojos se fijan en un objeto, en realidad siguen saltando y temblando de forma imperceptible. Lo hacen de una manera que resulta decisiva para la visión.
- Durante decenios, los investigadores han debatido en torno a la función, si existe, que cumplirían los movimientos de fijación visual; de éstos, los movimientos microsacádicos son los de mayor tamaño. Pero los autores han logrado demostrar que los movimientos microsacádicos producen visibilidad cuando las personas fijan la mirada; han observado también que los movimientos microsacádicos de mayor tamaño y velocidad son los óptimos.
- Los movimientos microsacádicos pueden arrojar luz sobre los pensamientos subliminales. De acuerdo con trabajos recientes, la dirección de los movimientos microsacádicos estaría sesgada hacia los objetos que atraen a la gente de forma inconsciente, al margen del lugar al que dirijan su mirada.

Mientras lee esta página, sus ojos se mueven rápidamente de izquierda a derecha en pequeños saltos, puestas en su foco una palabra tras otra. Cuando usted observa el rostro de una persona, sus ojos van, también, de aquí para allá, descansando momentáneamente en un ojo, el otro ojo, la nariz, la boca y otras facciones. Con un poco de introspección, usted puede detectar esa flexión frecuente de los músculos de sus ojos mientras inspecciona una página, rostro o escena.

Pero estos movimientos amplios y voluntarios de los ojos, movimientos sacádicos, constituyen sólo una parte pequeña del ejercicio diario que realizan los músculos oculares. Sus ojos *nunca* dejan de moverse, ni siquiera cuando parecen fijos en la nariz de una persona o en un velero que navega por el horizonte. Cuando los ojos se fijan en algo, lo que hacen durante el 80 por ciento del tiempo que permanecemos despiertos, siguen en realidad saltando y tremolando imperceptiblemente. Y lo hacen de una manera que resulta crítica para la visión. Si usted pudiese detener tales movimientos minúsculos cuando fija la mirada, desaparecerían de su vista las escenas estáticas.

Pero hasta fecha reciente los científicos no habían reparado en la importancia de tales movimientos de "fijación" visual. A lo largo de cincuenta años se vino debatiendo si los movimientos invo-

JENS NIETH *zefa/Corbis (fotógrafo)*; JEN CHRISTIANSEN *(fotoilustración)*

a mente

luntarios de fijación visual de mayor tamaño, los movimientos microsacádicos, cumplían alguna función. Hubo incluso quien sostuvo que los movimientos microsacádicos podrían perjudicar la visión, haciéndola más borrosa. Pero el trabajo reciente de uno de los autores (Martinez-Conde) en el Instituto Barrow de Neurología en Phoenix, Arizona, ha aportado el argumento más convincente de que este minúsculo deambular de los ojos separa la visión de la ceguera cuando una persona observa un mundo estacionario.

Al propio tiempo, los movimientos microsacádicos están ayudando a los neurocientíficos a descifrar el código que el cerebro utiliza para crear la percepción consciente del entorno. Durante los últimos años, los autores y otros investigadores han detectado patrones de actividad nerviosa muy ilustrativos que guardan correlación con esos movimientos, que, así pensamos, dan lugar a la mayor parte de nuestra percepción. Más aún, los movimientos microsacádicos pueden abrir una ventana a la mente. No se dan al azar, sino que pueden apuntar hacia donde su mente se polariza en secreto —aun cuando la mirada se dirija a otro lugar— y revelar, en consecuencia, pensamientos y deseos ocultos.

Cansancio por la reiteración de lo mismo

Que los ojos se mueven constantemente es algo sabido desde hace siglos. En 1860, Hermann von Helmholtz señalaba ya que el mantener los ojos inmóviles constituía un propósito harto difícil y sugería que el "deambular de la mirada" evitaba el cansancio de la retina, integrada por varias capas de células en el fondo del ojo.

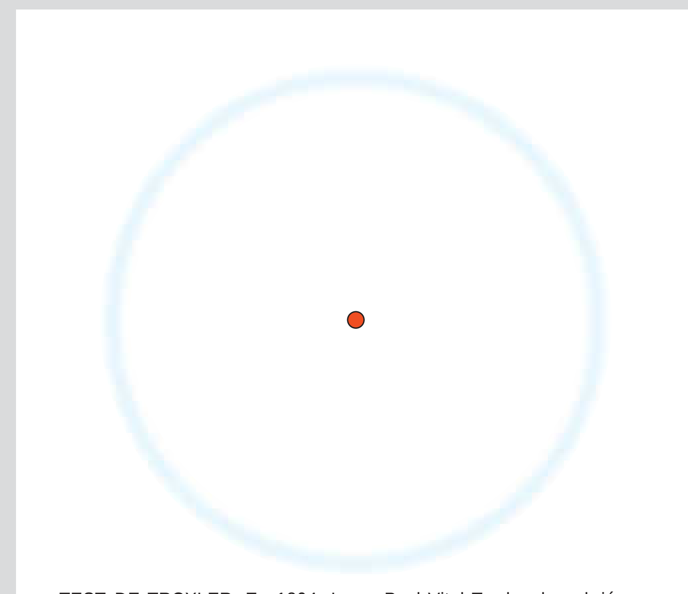
El sistema nervioso de los animales ha evolucionado para detectar los cambios en el entorno. Descubrir las diferencias resultaba ventajoso para la supervivencia. Un movimiento en el campo visual puede indicar que un depredador se aproxima o que la presa se escapa. Tales cambios hacen que las neuronas visuales respondan con impulsos electroquímicos. Los objetos inmóviles no presentan de ordinario amenaza alguna, razón por la cual los cerebros de los animales —y sus sistemas visuales— no evolucionaron en el sentido de su detección. Las ranas corresponden a un caso extremo. Una mosca posada en la pared resulta invisible para una rana, tal como lo son todos los objetos estáticos. Pero una vez que la mosca emprende el vuelo, la rana la detecta de inmediato y la captura con su lengua.

Las ranas no ven objetos inmóviles porque, como ya propuso Helmholtz, un estímulo inmutable provoca que las neuronas visuales adapten sus respuestas y vayan remitiendo éstas de forma gradual hasta desaparecer. La adaptación neural ahorra energía, aunque impone también límites en la percepción sensorial. Las neuronas humanas se adaptan al objeto fijo, pero el sistema visual humano detecta objetos inmóviles mucho mejor que el de la rana, pues los ojos humanos crean su propio movimiento. Los movimientos de fijación visual

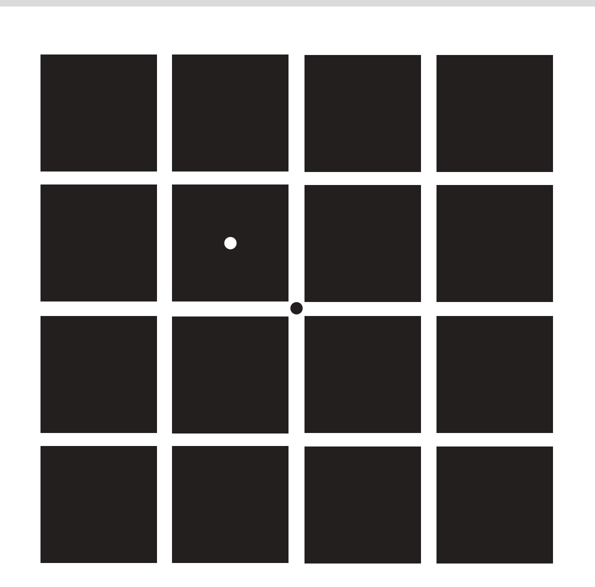
FUENTES: IGNAZ PAUL VITAL TROXLER (*izquierda*); "A SIMPLE AFTER IMAGE METHOD DEMOSTRATING THE INVOLUNTARY MULTIDIRECTIONAL EYE MOVEMENTS DURING FIXATION", POR F. J. VERHEIJEN EN *JOURNAL OF MODERN OPTICS*, VOL. 8, N.º 4, PAGS. 309-312; OCTUBRE DE 1961; TAYLOR AND FRANCIS LTD. (*derecha*)

MICROMOVIMIENTOS OCULARES

Estas tres ilustraciones muestran algunos de los efectos ópticos que producen los movimientos de fijación visual, a menudo inconscientes.



TEST DE TROXLER: En 1804, Ignaz Paul Vital Troxler descubrió que, al fijar la mirada de forma deliberada, se desvanecían las imágenes estacionarias de su alrededor Para producir ese efecto, el lector fije la mirada en el punto rojo mientras presta atención al círculo azul pálido. El círculo no tarda en desaparecer; el punto rojo aparece situado contra un fondo blanco. Mueva los ojos; el círculo azul reaparecerá de inmediato.

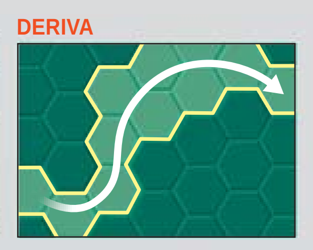


ASI SE MUEVEN SUS OJOS: un método para "ver" sus movimientos de fijación visual. Fije la vista en el punto central de color negro durante un minuto; a continuación, dirija la mirada al punto blanco sobre la casilla negra adyacente. Observe que la post-imagen oscura del entrerrejado blanco se halla en constante movimiento, un movimiento que resulta de los movimientos oculares que se producen durante la fijación visual.

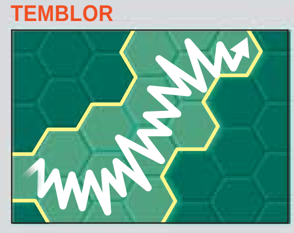
MOVIMIENTO MICROSACADICO

Fotorreceptor activado

DERIVA



TEMBLOR



ESTIMULOS EN MOVIMIENTO

Los movimientos de fijación visual, incluidos los microsacádicos (*líneas rectas*), la deriva (*líneas onduladas*) y el temblor (*zigzag superpuesto sobre la deriva*), transportan la imagen visual sobre el mosaico de fotorreceptores de la retina.

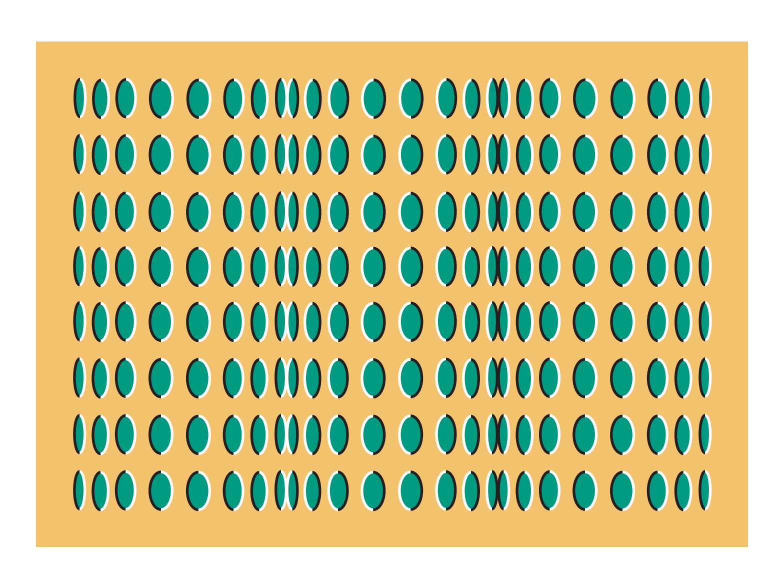
JEN CHRISTIANSEN (*diagramas de la derecha*); FUENTE: AKIYOSHI KITAOKA, © 2004 (*abajo*)

desplazan la totalidad de la escena visual a través de la retina, lo que desencadena la acción de las neuronas visuales y contrarresta la adaptación neural. De ese modo se previene el desvanecimiento visual de los objetos estáticos.

En 1804, Ignaz Paul Vital Troxler describió el primer fenómeno de desvanecimiento visual en humanos relacionado con una caída de los movimientos de fijación visual. Troxler observó que el enfoque deliberado de la mirada sobre un objeto provocaba que las imágenes estacionarias circundantes se desvanecieran de forma gradual. Tal desvanecimiento ocurre a diario, puesto que el enfoque consciente de la mirada en un objeto provoca la reducción o enlentecimiento de los movimientos de fijación visual, que pierden entonces eficacia fuera del área de enfoque. Basta entonces una pequeña disminución de la frecuencia y tamaño de los movimientos oculares para que se registre una grave merma en la visión. Tal deterioro suele ser imperceptible, dado que no prestamos atención a las zonas invisibles del campo visual; en su lugar nos concentramos en lo que tenemos directamente enfrente.

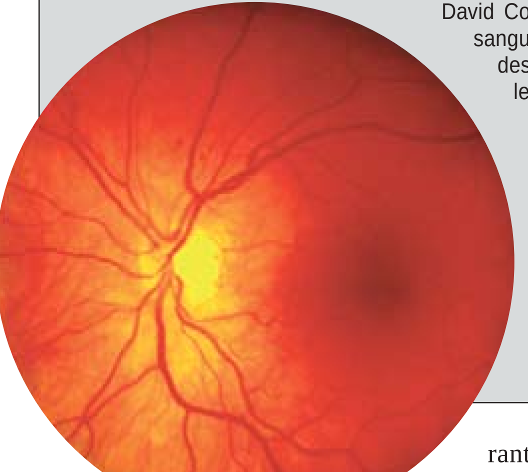
La supresión absoluta de todos los movimientos oculares sólo puede llevarse a cabo en el laboratorio. A principios de los años cincuenta del siglo pasado, varios equipos de investigación lo consiguieron. Montaron un proyector de diapositivas diminuto sobre una lente de contacto y fijaron luego la lente al ojo de una persona mediante un mecanismo de succión. Con semejante artilugio, el sujeto observaba la imagen proyectada a través de la lente, que se movía con el ojo. Esa técnica de estabilización retiniana logra que la imagen permanezca estacionaria con respecto al ojo, lo que permite que las neuronas visuales se adapten y la imagen se desvanezca. Hoy en día, se obtiene ese mismo efecto midiendo los movimientos oculares con una cámara de vídeo. La información sobre la posición de los ojos se transmite a un sistema de proyección, que mueve la imagen con los ojos.

A finales de los años cincuenta, los investigadores aislaron una función de los movimientos microsacádicos: tras suprimir todos los movimientos de los ojos en el laboratorio, incluidos los sacádicos voluntarios de mayor tamaño, superpusieron movimientos similares a los microsacádicos y encontraron que estos movimientos restablecían la percepción. Otros equipos de investigadores, sin embargo, obtuvieron diferentes resultados: la adición de movimientos microsacádicos, tras paralizar los movimientos de los ojos, constituyó una estrategia estéril. Discernir cuál de los resultados respondía a la realidad, no fue fácil, toda vez que ninguna de las técnicas empleadas para estabilizar la retina era perfecta. Piénsese que una lente de contacto conectada al ojo puede resbalar y deslizarse, con los consiguientes movimientos residuales de los ojos. Lo cierto es que no pudo averiguarse si los resultados experimentales se debían a los movimientos residuales mencionados o



MOVIMIENTO ILUSORIO: Pasee la vista sobre el patrón superior; le parecerá que los tres “rodillos” rotan. Si fija la mirada sobre uno de los círculos verdes del centro de la imagen, el movimiento ilusorio se enlentecerá o cesará por completo. Dado que la fijación de la mirada detiene el movimiento ilusorio, los autores suponemos que los movimientos de fijación visual pueden ser necesarios para percibirlo, aunque de momento se desconoce el modo en que operan.

VASOS QUE SE DESVANECEN



David Coppola y Dale Purves, de la Universidad de Duke, mostraron que los vasos sanguíneos de la retina, que son estacionarios con respecto a cada ojo, pueden desvanecerse de nuestra visión en sólo 80 milisegundos. Puede comprobarlo el lector consigo mismo. Cierre los ojos mientras apoya ligeramente una pequeña linterna (¡que no sea demasiado brillante!) contra el lado de uno de sus ojos. Si mueve la linterna rápidamente contra el párpado, quizá vislumbre, por breve tiempo y con su visión periférica, los vasos sanguíneos de la retina. Repare en la rapidez con que se desvanecen de la vista. La adaptación neural tiene lugar en todos los sentidos, tacto incluido. Por ejemplo, usted puede notar los zapatos al ponérselos por la mañana, pero esa sensación desaparece al cabo de un rato. Si mueve los dedos de los pies, volverá a sentir los zapatos. Del mismo modo, los movimientos de fijación visual desplazan las imágenes sobre la retina constantemente, con lo que su visión nunca se desvanece.

STEVE ALLEN *Brand X/Corbis*

a los microsacádicos que se habían superpuesto sobre la imagen.

¿Tics nerviosos?

Durante esa misma época, se identificaron otros dos tipos de movimientos de fijación visual: deriva y temblor. La deriva designa un movimiento lento y errático que se produce en los intervalos entre movimientos microsacádicos, celerísimos y lineales. El temblor, una oscilación diminuta y rápida, se superpone a la deriva. Los microsacádicos, los movimientos de fijación visual de mayor entidad, transportan la imagen a través de docenas o centenares de fotorreceptores (células detectoras de luz), incluidos los conos, para una detallada visión en color, y los bastones, para la visión periférica y en condiciones de baja luminosidad. El temblor constituye el menor de todos los movimientos de fijación visual; el desplazamiento del ojo no es mayor que el tamaño de una de esas células. Sin embargo, no entendemos todavía la función de cada uno de los movimientos de fijación visual.

De hecho, durante decenios, muchos expertos cuestionaron que los movimientos de fijación visual —sobre todo los microsacádicos, que habían sido objeto de la mayoría de las investigaciones— desempeñaran una función en el mantenimiento de la visión. Los críticos objetaron que algunos individuos podían suprimir sus movimientos microsacádicos durante un par de segundos sin que se desvaneciera su visión central. (Puede el lector comprobarlo a través del test de Troxler: cuando suprime sus movimientos microsacádicos de forma transitoria, el anillo se desvanece, pero el punto rojo central permanece visible. Los individuos suspenden sus movimientos microsacádicos de forma natural al llevar a cabo tareas de alta precisión, como disparar un rifle o enhebrar una aguja. En 1980, Eileen Kowler y Robert M. Steinman, de la Universidad de Maryland, llegaron a la conclusión de que los movimientos microsacádicos no servían para nada; se trataría, en su opinión, de un “mero tic nervioso”.

Así quedaron las cosas hasta finales de los años noventa, cuando comenzó a investigarse qué tipo de respuestas neuronales, de haber alguna, podrían generarse en el ojo y en el cerebro ante los movimientos de fijación visual. En 1997, junto con el premio Nobel David Hubel, de la Universidad de Harvard, comenzamos una serie de experimentos en los que entrenamos a monos a fijar la mirada en un punto que aparecía en el monitor de un ordenador; en otro lugar de la pantalla se presentaba además una barra de luz estacionaria. Mientras los simios observaban el punto, registramos los movimientos de sus ojos y la actividad eléctrica de las neuronas del núcleo geniculado lateral (NGL) en el cerebro medio y de la corteza visual primaria en la parte posterior del cerebro. En cada experimento, situamos la barra en el lugar que elicitaría óptimas respuestas eléctricas —en forma de impulsos llamados espigas— en las neuronas registradas.

Los resultados de estos experimentos, publicados en 2000 y 2002, mostraron que los movimientos microsacádicos aumentaban la frecuencia de impulsos neurales que se generaban en neuronas del NGL y la corteza visual, por medio del desplazamiento de estímulos estacionarios (la barra de luz), dentro y fuera del campo receptor de la neurona, la región del espacio visual que activa la neurona en cuestión. Ese descubrimiento reforzó la tesis del papel importante que los movimientos microsacádicos desempeñaban en la prevención del desvanecimiento visual y en el mantenimiento de la imagen visible. Y dando por supuesto ese papel para los movimientos microsacádicos, nuestra investigación neurológica comenzó a descifrar el código para la visibilidad. En los ensayos con monos, observamos que los movimientos microsacádicos iban asociados a rápidas ráfagas de espigas de las neuronas del cerebro y no a espigas aisladas, de lo que cabía inferir que las ráfagas de espigas eran una señal cerebral de que algo es visible.

Se resuelve el caso

Otros investigadores hallaron también que los movimientos microsacádicos instaban respuestas neuronales en cada parte del sistema visual examinada. Persistía, sin embargo, una sombra de confusión en el campo, la que arrojaban los resultados contradictorios de los experimentos de estabilización retiniana, que cuestionaban la importancia de los

movimientos microsacádicos para la visión.

Así las cosas, hace escasos años, nos decidimos, en el Instituto Barrow de Neurología, a abordar la medición directa de la relación entre movimientos microsacádicos y visibilidad, recurriendo a una técnica completamente diferente. Solicitamos de los voluntarios participantes en los ensayos que ejecutaran una versión de la tarea de desvanecimiento visual de Troxler. En concreto, debían fijar la mirada en un punto, mientras apretaban o soltaban un botón si veían o no un estímulo visual estático. El estímulo se desvanecería y reaparecería mientras cada voluntario fijaba más o menos su mirada, de forma natural, en momentos específicos durante el transcurso del ensayo. Mientras se acometía la tarea, medimos los movimientos de fijación visual de cada participante con un sistema de vídeo de alta precisión.

De acuerdo con nuestras previsiones, los movimientos microsacádicos de los voluntarios menguaron en número, tamaño y celeridad, justo antes de desvanecerse el estímulo. Nos indicaba ello que la ausencia de movimientos microsacádicos —o la presencia de movimientos microsacádicos pequeños y lentos— originaba la adaptación y el desvanecimiento visual. En coherencia también con nuestra hipótesis, los movimientos microsacádicos aumentaron en número, magnitud y celeridad justo antes de reaparecer el estímulo periférico. Estos resultados, publicados en 2006, demostraban que los movimientos microsacádicos generaban visibilidad cuando los voluntarios trataban de fijar la mirada en una imagen; demostraban, además, que los movimientos microsacádicos más veloces y de mayor tamaño eran los más eficaces

REFRESCANDO LA IMAGEN

La visión comienza cuando la luz reflejada por un objeto incide sobre la retina, una membrana de varias capas de células situada en el fondo del ojo.

Luz
Célula ganglionar
Célula amacrina
Célula horizontal
Célula bipolar
Células fotorreceptoras
Cono
Bastón

La luz viaja a la parte posterior de la retina, donde las células fotorreceptoras transforman la energía lumínica en señales neurales. Los movimientos de fijación visual, así los microsacádicos, reavivan la actividad neural varias veces por segundo; es decir, cada movimiento hace que cada grupo de fotorreceptores intercepte la luz procedente de una parte distinta de la escena visual, con la modificación consiguiente de sus respuestas. Los movimientos microsacádicos alteran de forma similar la respuesta de otras células del sistema visual. Sin esos movimientos, las neuronas visuales se adaptarían a los estímulos estáticos mediante la disminución de la actividad; la visión se desvanecería.

Luz
Retina
Nervio óptico
Nervio óptico
Núcleo geniculado lateral
Radiación óptica
Corteza visual primaria

MOSAICO DE FOTORRECEPTORES
Movimiento microsacádico
Fotorreceptor activado

Los impulsos neurales de la retina se transmiten con celeridad a lo largo del nervio óptico —un cable compuesto de un millón de fibras— hasta el cerebro. Allí, las señales visuales hacen su primera parada en el núcleo geniculado lateral del tálamo; a continuación, unas cuerdas neurales llamadas radiaciones ópticas las transmiten a la corteza visual primaria en la parte posterior del cerebro.

JEN CHRISTIANSEN

para dicho propósito. Y dado que los ojos permanecen fijos la mayor parte del tiempo —descansan entre movimientos sacádicos voluntarios de cierta entidad—, los movimientos microsacádicos resultan decisivos para la percepción visual.

Este trabajo no sólo reviste una importancia teórica, sino que puede también tener implicaciones terapéuticas. Una mejor comprensión de la función de los movimientos de fijación visual en la visión puede arrojar luz sobre trastornos y condiciones que degraden tales movimientos. Por ejemplo, la falta de movimientos de fijación visual puede ser consecuencia de la parálisis de los nervios oculomotores, que controlan la mayoría de los movimientos de los ojos. Movimientos de fijación visual anormales son habituales en la ambliopía, u "ojo vago", una pérdida de la visión de detalle que no conlleva ninguna patología detectable, y es causa principal de ceguera en uno de los dos ojos en pacientes de 20 a 70 años. En la ambliopía severa, la deriva excesiva y la escasez de movimientos microsacádicos pueden dar lugar al desvanecimiento de objetos e incluso de grandes porciones de la escena visual, durante la fijación.

En la visión normal, el sistema oculomotor debe alcanzar un delicado equilibrio entre un exceso de movimientos de fijación visual (que llevarían a una visión borrosa e inestable durante los períodos de fijación) y una penuria de movimientos de fijación (causante del desvanecimiento visual). Comprender el modo en que el sistema de movimiento de los ojos alcanza tal equilibrio podría un día permitir que los oftalmólogos recalibren el sistema, si falla. Son cuantiosos los trastornos que repercuten en los movimientos de fijación visual. De ahí el atractivo de ese campo para la investigación, hasta ahora apenas explorado.

Leer la mente

El interés de los movimientos microsacádicos trasciende el dominio de la visión. Estos pequeños movimientos de los ojos pueden además contribuir a revelar pensamientos subliminales de una persona. Los psicólogos han descubierto que, aun cuando uno fije la mirada, su atención visual puede inconscientemente desplazarse hacia objetos que atraen su interés. Ciertos trabajos recientes sugieren que los movimientos microsacádicos revelan tales objetos de atracción, ya que su dirección lejos de ser completamente aleatoria, puede apuntar directamente a los objetos en cuestión, no importa que estemos mirando hacia otro sitio.

Ziad M. Hafed y James J. Clark, de la Universidad McGill, solicitaron a los voluntarios de sus ensayos que dirigieran los ojos hacia un punto central de la pantalla de un ordenador y, al mismo tiempo, prestaran atención a un punto periférico, que cambiaba de color al final de cada tarea. Los voluntarios debían indicar el cambio de color. En 2002 Hafed y Clark publicaban que la dirección de los movimientos microsacádicos de los sujetos estaba sesgada hacia su verdadero foco de atención, a pesar de que los voluntarios estuvieran mirando hacia otro sitio. Tal hallazgo indicaba no sólo que los movimientos microsacádicos podían remitir a los pensamientos ocultos de la gente, sino también que los cambios secretos de atención controlaban la dirección de los movimientos microsacádicos.

En otro experimento, Ralf Engbert y Reinhold Kliegl, de la Universidad de Potsdam, hallaron que la *frecuencia* de los movimientos microsacádicos indicaba la presencia de algo que atraía secretamente la atención de una persona. La aparición repentina de un estímulo óptico en la periferia del campo visual del voluntario, informaron en 2003, causaba primero una breve caída en la tasa de movimientos microsacádicos, seguida por un rápido rebote en el que la frecuencia de los movimientos microsacádicos excede la normal. Además, los movimientos microsacádicos que detectaron estaban sesgados hacia la dirección del estímulo desencadenante. Del trabajo de los autores alemanes se desprende que la frecuencia y la dirección de los movimientos microsacádicos indicarían cambios repentinos en el entorno que atraen la atención de una persona, aun cuando no centre su mirada en tales cambios.

Por tanto, no importa que usted intente desviar los ojos de la última porción de tarta sobre la mesa, ni de ese hombre o mujer tan atractivos al otro extremo de la estancia; la tasa y dirección de sus movimientos mi-

VIENDO CON LOS MOVIMIENTOS MICROSACADICOS

En un experimento reciente, los autores demostraron que los movimientos microsacádicos generaban visibilidad cuando las personas fijaban la mirada. Solicitaron a los voluntarios que fijasen la vista en un punto de la pantalla de un ordenador (*fila de cajas*); de ese modo, un estímulo periférico estacionario se desvanecía de su visión, para volver a aparecer a continuación. Justo antes de desvanecerse el estímulo, los movimientos microsacádicos de los observadores decaían y se tornaban más lentos; justo antes de reaparecer el estímulo, estos movimientos oculares multiplicaban de nuevo su frecuencia (*gráfica*).

ACTIVIDAD MICROSACADICA
Porcentaje de cambio con respecto al azar
+25
0
–25
Tiempo
Tiempo
Invisible
Visible

JEN CHRISTIANSEN



MONITOR DE ATENCION. Mediante el seguimiento de los movimientos microsacádicos los expertos determinan si en la escena visual hay algo que resulta secretamente atractivo para la atención de una persona, aun cuando ésta mire hacia otro lugar.



crosacádicos traicionarán su foco de atención. Sin embargo, esta traición no es algo que deba preocuparle. En el laboratorio, los científicos pueden detectar y medir esos movimientos mínimos de los ojos para revelar los mecanismos cerebrales de la atención, pero las personas de su alrededor no pueden utilizarlos para leer su mente, de momento.

Los autores

Susana Martinez-Conde dirige el laboratorio de neurociencia visual en el Instituto Barrow de Neurología en Phoenix. Se doctoró en medicina y cirugía por la Universidad de Santiago de Compostela. **Stephen L. Macknik** es el director del laboratorio de neurofisiología del comportamiento en el Instituto Barrow; obtuvo su doctorado en neurobiología por la Universidad de Harvard.

Bibliografía complementaria

MICROSACCADES AS AN OVERT MEASURE OF COVERT ATTENTION SHIFTS. Z. M. Hafed y J. J. Clark en *Vision Research*, vol. 42, págs. 2533-2545; 2002.

MICROSACCADES UNCOVER THE ORIENTATION OF COVERT ATTENTION. R. Engbert y R. Kliegl en *Vision Research*, vol. 43, págs. 1035–1045; 2003.

The Role of Fixational Eye Movements in Visual Perception. S. Martinez-Conde, S. L. Macknik y D. H. Hubel en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 5, págs. 229–240; 2004.

FIXATIONAL EYE MOVEMENTS IN NORMAL AND PATHOLOGICAL VISION. S. Martinez-Conde en *Progress in Brain Research*, vol. 154, págs. 151–176; 2006.

MICROSACCADES COUNTERACT VISUAL FADING DURING FIXATION. S. Martinez-Conde, S. L. Macknik, X. G. Troncoso y T. A. Dyar en *Neuron*, vol. 49, págs. 297–305; 2006.

La melatonina

Sobre la glándula pineal y su producto, la melatonina, están trabajando varios equipos de investigación. En los próximos años deberían quedar aclarados sus mecanismos de acción y sus funciones

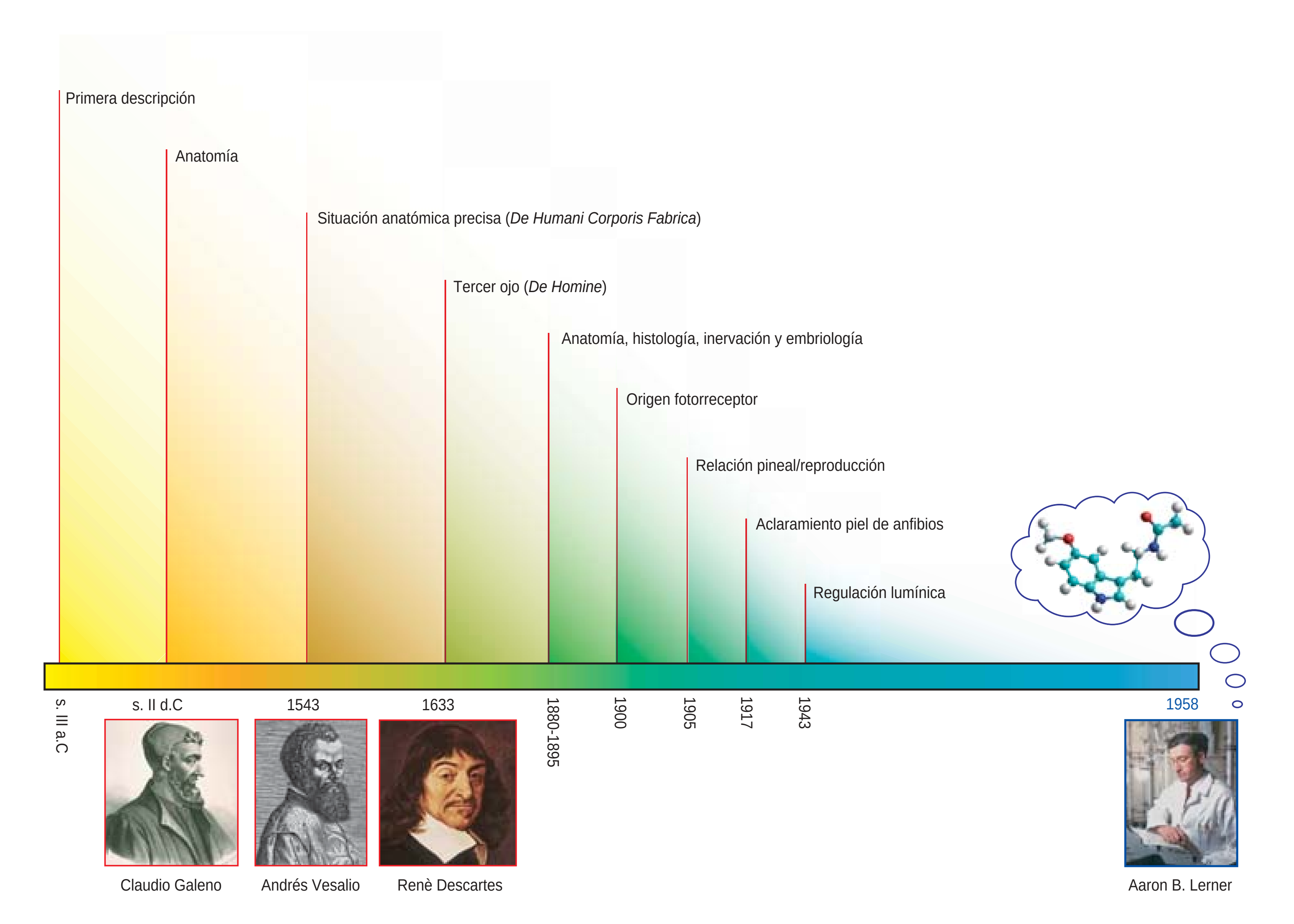
Juan M. Guerrero, Antonio Carrillo-Vico y Patricia J. Lardone

La melatonina se produce en la glándula pineal, o epífisis. Esta es una glándula impar, esférica, situada en el centro del cerebro, sobre el techo del tercer ventrículo cerebral. Por sus características anatómicas llamó muy pronto la atención de los médicos. La primera descripción de la glándula pineal se atribuye a Herófilo de Alejandría, en el siglo III a.C., quien la vinculó a funciones valvulares reguladoras del “flujo del pensamiento” en el sistema ventricular. Galeno (s. II d.C.) describió su anatomía y la llamó *konarium* (cono de piña), denominación que ha perdurado hasta nuestros días junto con la de pineal, de *pinea* (piña en latín). Además, el de Pérgamo observó que la estructura pineal poseía un parecido estructural con las glándulas mayor que con el sistema nervioso.

El siguiente avance en el conocimiento de la pineal tuvo lugar en el Renacimiento. De manera singular, Andrés Vesalio aportó una descripción anatómica precisa en su *De Humani Corporis Fabrica* (1543). René Descartes la calificó en su póstumo *De Homine* (1633) de tercer ojo, no por su papel en el control del fotoperíodo, aún desconocido, sino porque, según su concepción dualista, constituía la sede del alma. Descartes le asignó, además, una función fisiológica: incluida en el sistema nervioso, la glándula pineal se encargaba de la percepción del entorno. Con ese planteamiento se llega hasta el siglo XIX, cuando se abordó la glándula pineal de los mamíferos desde distintos frentes —anatómico, histológico y embriológico— y se mostró su semejanza con la epífisis de vertebrados inferiores. En 1905, Studnicka estableció que la pineal derivaba filogenéticamente de un órgano fotorreceptor con función desconocida.

El siglo XX comenzó arrojando alguna luz sobre el papel fisiológico de la glándula pineal. Así, Heubner publicó el caso clínico de tres niñas que presentaban tumores pineales asociados a una pubertad precoz. Supuso que una hormona antigonadotrópica de origen pineal estaba implicada en el control del comienzo de la etapa puberal. Se estableció una relación entre la glándula pineal y la reproducción. En 1943, Bargman sugirió que la función endocrina de la glándula estaba regulada por la luz a través del sistema nervioso central.

La era actual del conocimiento pineal se inicia en 1954 con la publicación de *The Pineal Gland*, de Julian Kitay y Mark Altschule, que atribuían a la glándula tres propiedades: su intervención en el control de la función gonadal, su participación en la respuesta cromática dérmica a los cambios de luz ambiental en vertebrados inferiores y alguna vinculación con la conducta. En ese mismo año, Aaron Lerner, basándose en estudios realizados en 1917 por McCord y Allen, comenzaba su trabajo encaminado al aislamiento del factor pineal responsable del aclaramiento de la piel de anfibios, que condujeron en 1958 a la identificación de la melatonina. Por primera vez se disponía de una sustancia pura que reproducía los efectos de los extractos pineales y revertía las secuelas de la pinealectomía.



1. LA DESCRIPCION de la glándula pineal se remonta a la antigüedad clásica. Este diagrama expone algunos de los hitos fundamentales del avance en su conocimiento.

A partir de estudios fisiológicos y anatómicos, se constató que la síntesis de melatonina en mamíferos estaba controlada por la luz ambiental a través de una vía neural cuya estación final eran las neuronas simpáticas del ganglio cervical superior. Por último, en 1965, dos hechos contribuyeron a consolidar el concepto de la glándula pineal como órgano neuroendocrino activo en los mamíferos. Hoffman y Reiter demostraron que la oscuridad, o fotoperíodos cortos, inducía cambios gonadales en el hámster, que podían ser suprimidos por la pinealectomía. En ese mismo año, Axelrod y Wurtman acuñaron la expresión "transductor neuroendocrino" para describir la glándula como un órgano que convierte un estímulo neural proveniente de la retina y originado por la luz ambiental en una respuesta endocrina, la producción de melatonina.

Desde que a mediados de los setenta del pasado siglo aparecieran los primeros anticuerpos altamente específicos para la melatonina, ésta se ha ido identificando en órganos, tejidos y células muy dispares, lo cual ha puesto de manifiesto la posibilidad de fuentes extrapineales de melatonina, con la consiguiente redefinición de la melatonina como una hormona exclusivamente pineal.

Síntesis de melatonina

La síntesis de melatonina en la glándula pineal está controlada por el núcleo supraquiasmático, que está sincronizado con el ciclo luz/oscuridad a través del tracto retinohipotalámico. Durante la noche, el núcleo supraquiasmático envía señales neurales a través de una vía multisináptica simpática, la vía retino-hipotálamico-pineal. Esta vía consta de los núcleos paraventriculares hipotalámicos, las células intermediolaterales y el ganglio cervical superior, que se proyecta sobre la glándula pineal e induce en ella la liberación nocturna de noradrenalina.

La unión de la noradrenalina a sus receptores específicos situados en las membranas de los pinealocitos (las células de la glándula pineal que segregan la melatonina) promueve la activación de la síntesis de melatonina. La formación de melatonina comienza con la captación del aminoácido triptófano (Trp), procedente del torrente circulatorio. El Trp es hidroxilado en la mitocondria por la Trp-hidroxilasa. La mayor parte del 5-HTP resultante se convierte en serotonina en el citosol, gracias a la intervención de una enzima descarboxilasa. Tras ello, la serotonina es acetilada por la arilalquilamina-*N*-acetiltransferasa (AA-NAT) y se produce N-acetilserotonina; metabolito que es O-metilado por otra enzima, la hidroxiindol-*O*-metiltransferasa (HIOMT), lo que da lugar a

JUAN M. GUERRERO, ANTONIO CARRILLO-VICO Y PATRICIA J. LARDONE

la melatonina. Presenta ésta un perfil rítmico de producción proporcional al estímulo noradrenérgico nocturno, con valores mínimos diurnos y máximos nocturnos.

Una vez sintetizada la melatonina, se libera al sistema vascular, accediendo a fluidos, tejidos y compartimentos celulares, como el cerebro, la saliva, orina, folículos preovulatorios, semen, líquido amniótico y leche materna. Debido a que no se acumula y a su rápida liberación a la sangre, los niveles de la hormona en este fluido son considerados el principal índice de síntesis pineal. La melatonina se metaboliza muy deprisa, fundamentalmente en el hígado, eliminándose por la orina. Su principal metabolito en humanos y roedores es la 6-sulfatoximelatonina, que puede encontrarse en sangre y en orina.

Melatonina extrapineal

Desde que Lerner la describió hasta mediados de los setenta, la melatonina se consideraba una hormona exclusiva de la glándula pineal. Desde hace diez años se vienen realizando numerosos estudios que han cambiado esa concepción clásica. Sabemos ya que, a diferencia de las hormonas clásicas, la melatonina se sintetiza en diversos órganos extrapineales no endocrinos.

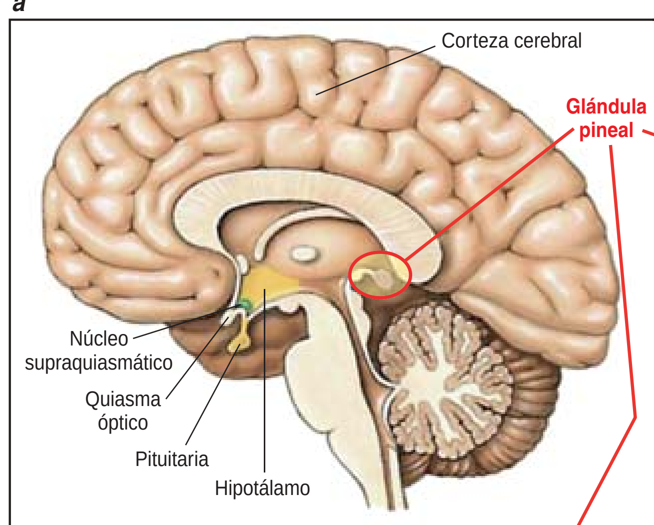
A comienzos de los setenta se publicaron varios trabajos que significaron el punto de partida de la era de la melatonina extrapineal. Se describió la presencia de HIOMT en la retina y en la glándula harderiana. Posteriormente se identificó la melatonina en retina y en cerebelo de rata, mono y humano. En 1975 se describió la presencia de melatonina y precursores de su ruta biosintética en las células enterocromafines —células del epitelio del tracto gastrointestinal productoras de serotonina— para generar melatonina. Un año después, Ozaki y Linch descubrieron melatonina plasmática en animales pinealectomizados.

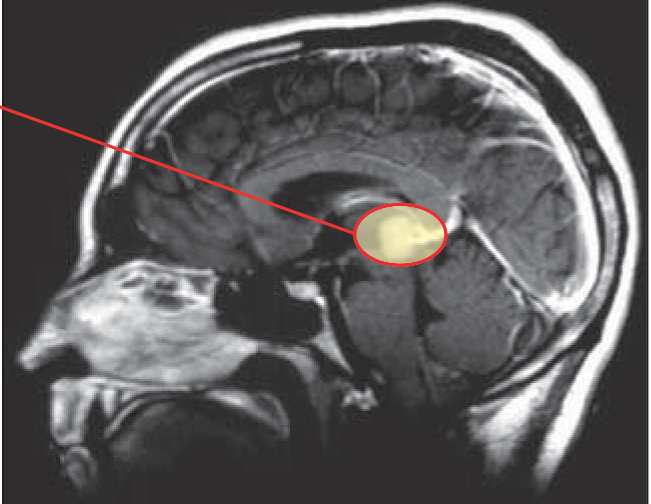
A raíz de estos estudios y con el desarrollo de anticuerpos altamente específicos para melatonina, la sustancia se ha identificado en numerosos órganos, tejidos y células de carácter endocrino y no endocrino. Constituyen fuentes extrapineales el cerebelo, el tracto gastrointestinal —donde se producen grandes cantidades de melatonina, que parece estar implicada en la secreción de bicarbonato y en la protección contra úlceras debido a su capacidad antioxidante— y el sistema inmunitario.

A propósito de este último, nuestro grupo de la Universidad de Sevilla no sólo ha descrito una síntesis activa de melatonina en linfocitos humanos, sino también un efecto fisiológico de la melatonina en la regulación de la producción de interleuquina 2 (sustancia proteica esencial para la acción inmunitaria) a través de un mecanismo intracrino —dentro de una misma célula—, autocrino —entre células iguales—, paracrino —entre células cercanas— o todos ellos. Con anterioridad se había sugerido una posible síntesis de melatonina en la médula ósea, la piel, la retina y la glándula harderiana (complementaria del lacrimal).

Acciones biológicas de la melatonina

Sabemos que la melatonina es un compuesto pleiotrópico con importantes propiedades cronobióticas. Se ha observado, en efecto, su capacidad para resincronizar el ritmo circadiano en diferentes situaciones, desde el ciclo circadiano libre de control medioambiental hasta el trabajo por turnos pasando por el malestar que acompaña a los viajes transoceánicos. Además, su capacidad para resincronizar los ritmos circadianos parece ser responsable de la regula-

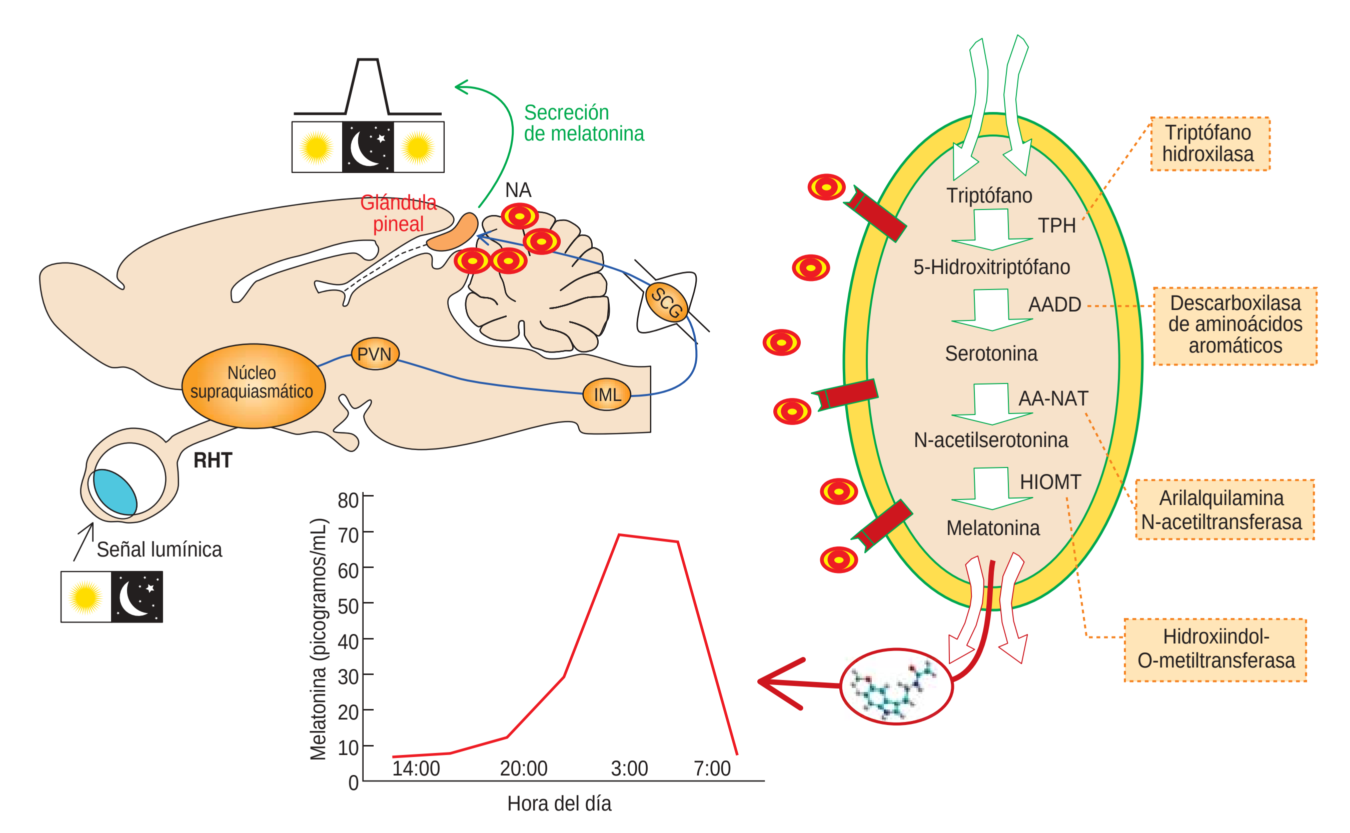






2. LA GLANDULA PINEAL deriva del tubo neural y está localizada entre el mesencéfalo y el diencéfalo; neuroanatómicamente, es parte del epitálamo (*a*). En los seres humanos, hacia la séptima semana de vida ya forma un órgano compacto, que en los adultos presenta una morfología ligeramente piramidal similar a un grano de maíz (*c*).

JUAN M. GUERRERO, ANTONIO CARRILLO-VICO Y PATRICIA J. LARDONE



3. LA ACTIVIDAD DE LA GLANDULA PINEAL depende de las condiciones lumínicas. La luz inhibe la producción de melatonina; la oscuridad la aumenta. La retina es el punto de reconocimiento del estado lumínico. Desde la retina se emite la información del ambiente lumínico hasta la pineal mediante un circuito neuronal en el que participan el nervio óptico, el núcleo supraquiasmático (SCN) y el ganglio cervical superior (SCG). La síntesis de la melatonina, que tiene lugar en el pinealocito, se desarrolla en cuatro reacciones, tras las cuales se difunde hacia el exterior siguiendo un gradiente de concentración y se distribuye por todos los compartimentos del organismo. (TPH, triptófano hidroxilasa; AADD, descarboxilasa de aminoácidos aromáticos; AANAT, arilalquilamina N-acetiltransferasa; HIOMT, hidroxiindol-O-metiltransferasa).

JUAN M. GUERRERO, ANTONIO CARRILLO-VICO Y PATRICIA J. LARDONE

ción que ejerce sobre los ciclos de sueño y vigilia.

La melatonina guarda relación con la maduración sexual de los humanos y actúa como marcador endocrino estacional para la reproducción de muchas especies estacionales. Posee, además, capacidad antioxidante: constituye un neutralizador directo de radicales libres y potencia el efecto de antioxidantes clásicos y de enzimas antioxidantes. Añádase su capacidad oncostática, puesta de manifiesto en modelos tumorales *in vivo* e *in vitro*, sobre todo en aquellos dependientes de hormonas; sin olvidar sus propiedades demostradas de adyuvante en diversas terapias antitumorales. En cuanto inmunomodulador, ejerce múltiples acciones sobre la morfología y funcionalidad de órganos primarios y secundarios del sistema inmunitario. En este dominio opera vía regulación de citoquinas. Por último, la melatonina repercute en el aumento en la longevidad y en la calidad de vida, a través sobre todo de sus propiedades antioxidantes, oncostáticas e inmunomoduladoras.

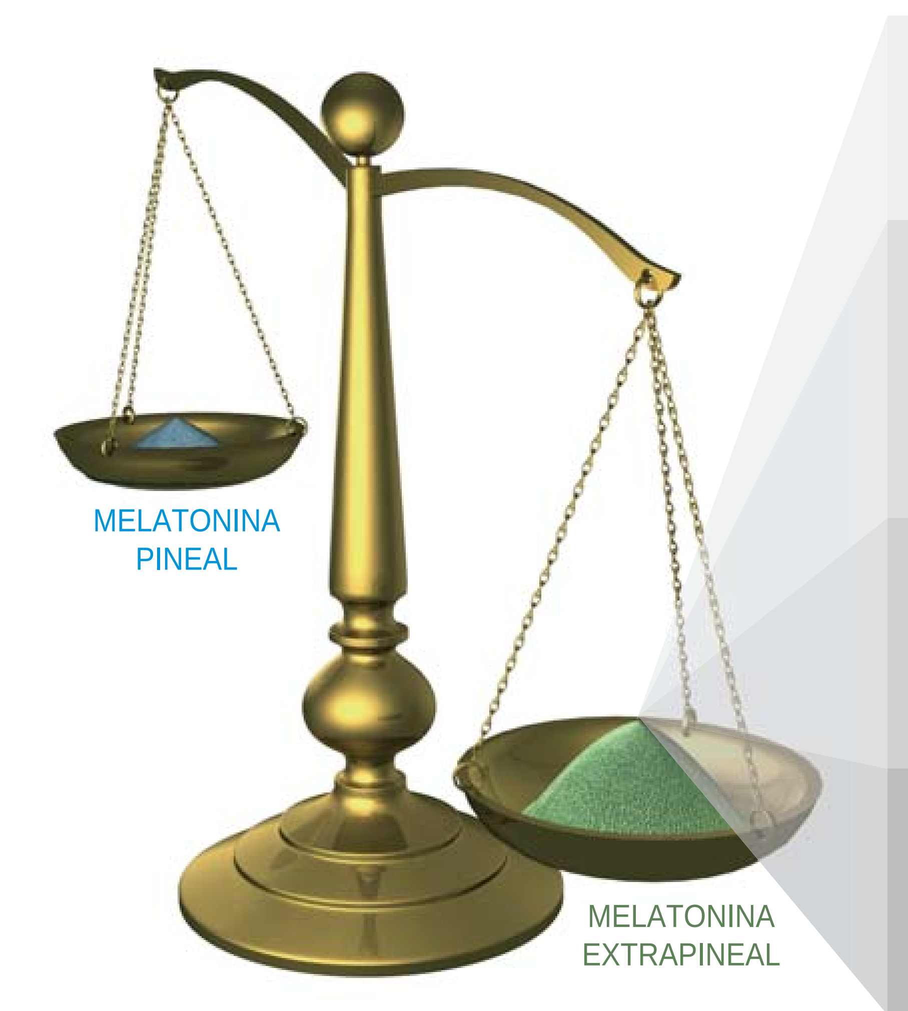
Efecto sincronizador del metabolismo con el ritmo circadiano

La mayoría de los organismos, incluidos los humanos, poseen un ritmo circadiano en muchos de sus procesos bioquímicos, fisiológicos y de comportamiento, como se pone de manifiesto en la producción de ciertos compuestos como la melatonina o la hormona del crecimiento, en la temperatura corporal, en el nivel de alerta y el tiempo de reacción, en la producción de triacilglicéridos o en el ciclo de sueño y vigilia, entre otros procesos.

En mamíferos, el control del ritmo circadiano es ejercido por el reloj endógeno principal, situado en el núcleo supraquiasmático, que está sincronizado por los niveles lumínicos ambientales percibidos por la retina y extiende su sincronización al resto del organismo mediante la síntesis rítmica de melatonina. Recíprocamente, la melatonina puede actuar sobre el núcleo supraquiasmático favoreciendo su resincronización ante cambios ambientales. Así, se ha observado que la administración de melatonina a últimas horas del día promueve un avance de fase en el ciclo circadiano, mientras que al final de la noche promueve un retraso. Estas propiedades cronobióticas constituyen la base de la relevancia clínica que la melatonina posee sobre diversos desequilibrios circadianos.

La melatonina y el sueño

Desde que Lerner describió la somnolencia de los pacientes a los que administraba melatonina, cuyos efectos sobre el vitíligo estudiaba, y habida cuenta de la clara correlación temporal existente entre la fase secretora de la misma y el ciclo del



4. LOS PRIMEROS INDICIOS de la existencia de fuentes alternativas de melatonina extrapineales se encontraron hace menos de diez años. Este descubrimiento ha cambiado la concepción clásica de la melatonina como hormona, ya que su síntesis ocurre también en numerosos órganos extrapineales no endocrinos.

JUAN M. GUERRERO, ANTONIO CARRILLO-VICO Y PATRICIA J. LARDONE

sueño, la influencia en éste de la melatonina se ha investigado ampliamente. En líneas generales, se ha observado que la administración de melatonina mejora la predisposición al sueño y su consolidación. Además, se ha observado su capacidad para resincronizar el ciclo de sueño y vigilia en pacientes con síndrome de fase del sueño retrasada y en ciegos. También disminuye la latencia y aumenta la eficacia en trastornos primarios del sueño y en insomnio asociado a ciertas patologías.

Aunque el principal mecanismo de acción por el cual la melatonina ejerce estos efectos parece ser su capacidad cronobiótica sobre el núcleo supraquiasmático, también se ha observado un efecto sobre los centros termorreguladores y cardiovasculares.

Efectos reguladores sobre la reproducción

Con el fin de adaptarse a los cambios anuales, los organismos que muestran ritmos estacionales presentan diversas oscilaciones en su comportamiento reproductor y alimentario, aspecto de la piel, peso, migración o predisposición a la hibernación, dependiendo de la especie. Se ha observado que los animales pinealectomizados no presentan cambios estacionales en su estado reproductor, y pierden su sincronización con el ciclo anual. Tras la administración de melatonina exógena, se recuperan. Los efectos de la melatonina sobre la reproducción estacional forman parte de la sincronización que la hormona ejerce sobre las funciones biológicas.

La melatonina también interviene en la maduración sexual de los humanos: el desarrollo puberal va ligado a un importante descenso en los niveles de melatonina plasmática. Una disfunción pineal puede adelantar la pubertad, mientras que una hiperproducción de melatonina puede retrasarla.

Aunque la especie humana no se caracteriza por la presencia de fuertes patrones estacionales, se ha comprobado cierta tendencia hacia la distribución estacional de las concepciones. En latitudes septentrionales, con dos horas extra de secreción de melatonina en invierno, aparecen descensos invernales en la concentración de esteroides y en los embarazos.

Efecto de la melatonina sobre el envejecimiento

La síntesis de melatonina no es constante a lo largo de la vida. En los humanos, su producción rítmica empieza a los tres o cuatro meses de edad. A partir de ahí, aumenta de forma espectacular hasta alcan-

zar su máximo entre los ocho y los diez años. Luego, coincidiendo con los cambios puberales, la producción disminuye con bastante brusquedad. En el individuo adulto, la concentración nocturna de melatonina va descendiendo paulatinamente hasta la vejez, de forma que por encima de los setenta años los niveles de la hormona no superan el 10 % de los prepuberales. De ello se infiere que la melatonina podría tener que ver, como causa o como efecto, en el envejecimiento. Cuestión que empezó a despejarse cuando diferentes grupos de investigadores observaron que la administración de la hormona a roedores adultos prolongaba su vida entre un 10 y 15 %. La pinealectomía la acortaba en una cuantía similar.

Aunque no existen suficientes datos que nos permitan afirmar que la melatonina es un agente rejuvenecedor, muchas de sus acciones sobre diversos procesos biológicos repercuten de forma beneficiosa en el envejecimiento.

Actividad antitumoral de la melatonina

Uno de los efectos que le confieren potencial terapéutico a la melatonina es su capacidad oncostática; suspende el crecimiento del tumor. Desde que en 1969 se describiera en un modelo animal de cáncer de mama, esa propiedad se ha ratificado en diversos tumores, espontáneos o inducidos, de rata, ratón y hámster. En humanos, la administración de melatonina reduce el crecimiento tumoral y prolonga la supervivencia, sobre todo en cánceres dependientes de hormonas reproductoras, como el de mama o el de ovario. Se comporta, además, como un potente adyuvante en tratamientos antitumorales con agentes quimioterapéuticos. *In vitro*, en estudios realizados en la línea celular MCF-7, derivada de carcinoma de mama, se ha puesto de relieve el efecto antiproliferativo y potenciador de diversos agentes quimioterapéuticos citotóxicos y citostáticos.

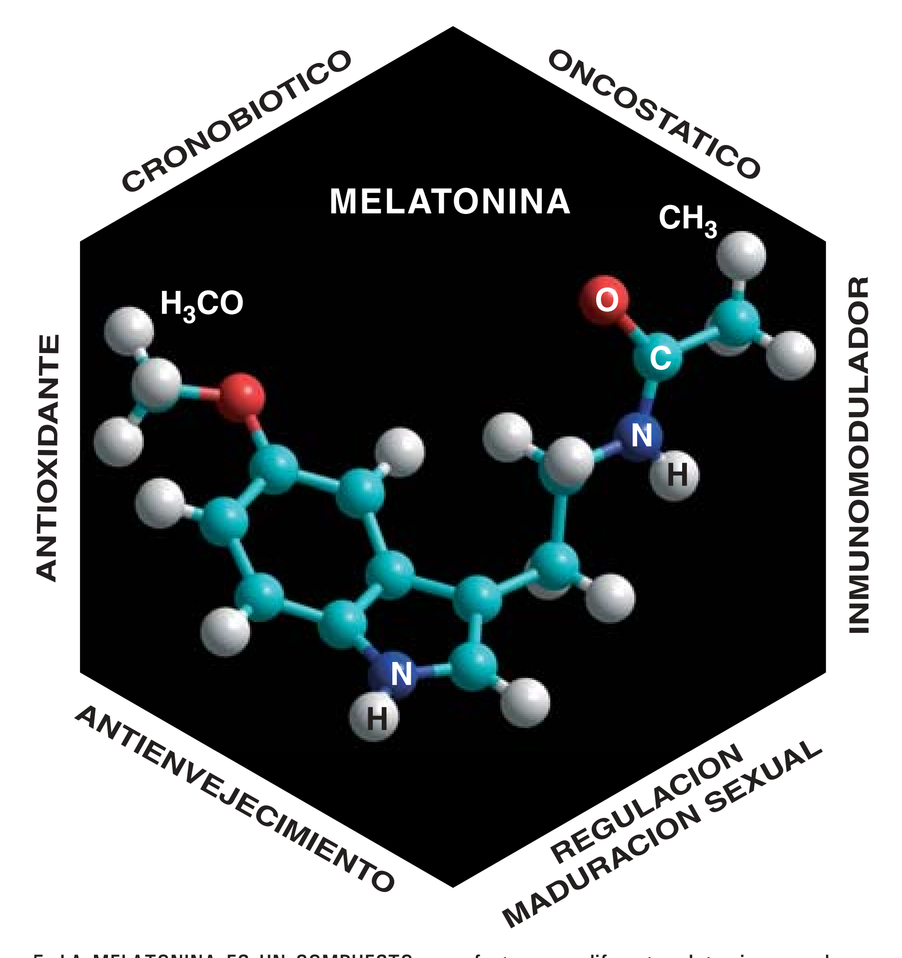
Los efectos antiproliferativos de la melatonina se han mostrado también en diversas líneas celulares de mama, ovario, coriocarcinoma, próstata, colon, melanoma, neuroblastoma y otros. La propia secreción natural de la hormona constituye una señal oncostática, ya que tras la pinealectomía se ha observado una aceleración en el crecimiento tumoral, contrarrestada con la administración de melatonina exógena.

Efecto inmunomodulador

Desde principios del siglo XX se sospechaba la relación de la glándula pineal con el sistema inmunitario, en razón del efecto trófico de la pineal sobre el timo. Se suponía la existencia de un eje pineal-timo. Pero hubo que esperar hasta mediados de los ochenta para obtener resultados que avalaran una función inmunoestimuladora de la melatonina. Uno de los primeros experimentos que dieron respaldo a esta hipótesis consistió en la inoculación en ratones del virus de la encefalopatía del mono verde africano. Este virus produce una encefalopatía, relativamente benigna, que, en condiciones de estrés, cuando el sistema inmunitario se encuentra deprimido, presenta una elevada tasa de mortalidad. En este modelo, la administración de melatonina contrarresta los efectos inmunodepresores del estrés, con la reducción consiguiente de la mortalidad.

En los últimos años, se ha venido corroborando la interrelación entre los sistemas neuroendocrino e inmunitario. La glándula pineal y su hormona se integran en esa red. Se ha comprobado, en efecto, la correlación entre la glándula y el sistema inmunitario a través de dos vías: por un lado, mediante modelos animales de pinealectomía, en los cuales se ha observado un descenso de peso en timo, bazo y nódulos linfáticos y una disminución de la respuesta inmunitaria; por otro, mediante la observación de la sincronización entre la ritmicidad en la síntesis de melatonina y la función inmunitaria.

Ha quedado, asimismo, demostrada la capacidad inmunomoduladora de la administración de melatonina,



5. LA MELATONINA ES UN COMPUESTO con efectos muy diferentes. Interviene en el control del tiempo biológico. Actúa como modulador de la maduración sexual y los ciclos de vigilia y sueño. Gracias a su capacidad antioxidante, oncostática e inmunomoduladora, y al descenso con la edad, se la considera un posible "agente del envejecimiento".

JUAN M. GUERRERO, ANTONIO CARRILLO-VICO Y PATRICIA J. LARDONE

en modelos *in vivo* e *in vitro*. La hormona, capaz de modular la respuesta inmunitaria innata y adaptativa, promueve un aumento del peso de órganos inmunitarios y estimula su función a través de la activación de la proliferación celular y de mediadores inmunológicos en timo, bazo y médula ósea. Además, estimula la actividad de neutrófilos, macrófagos y células NK y modula la producción de citoquinas. Respecto a la inmunidad adaptativa, la melatonina favorece el incremento de linfocitos B y T; regula tanto la respuesta humoral como la celular por medio de la modulación de mediadores, como la 5-lipoxigenasa o la IL-2.

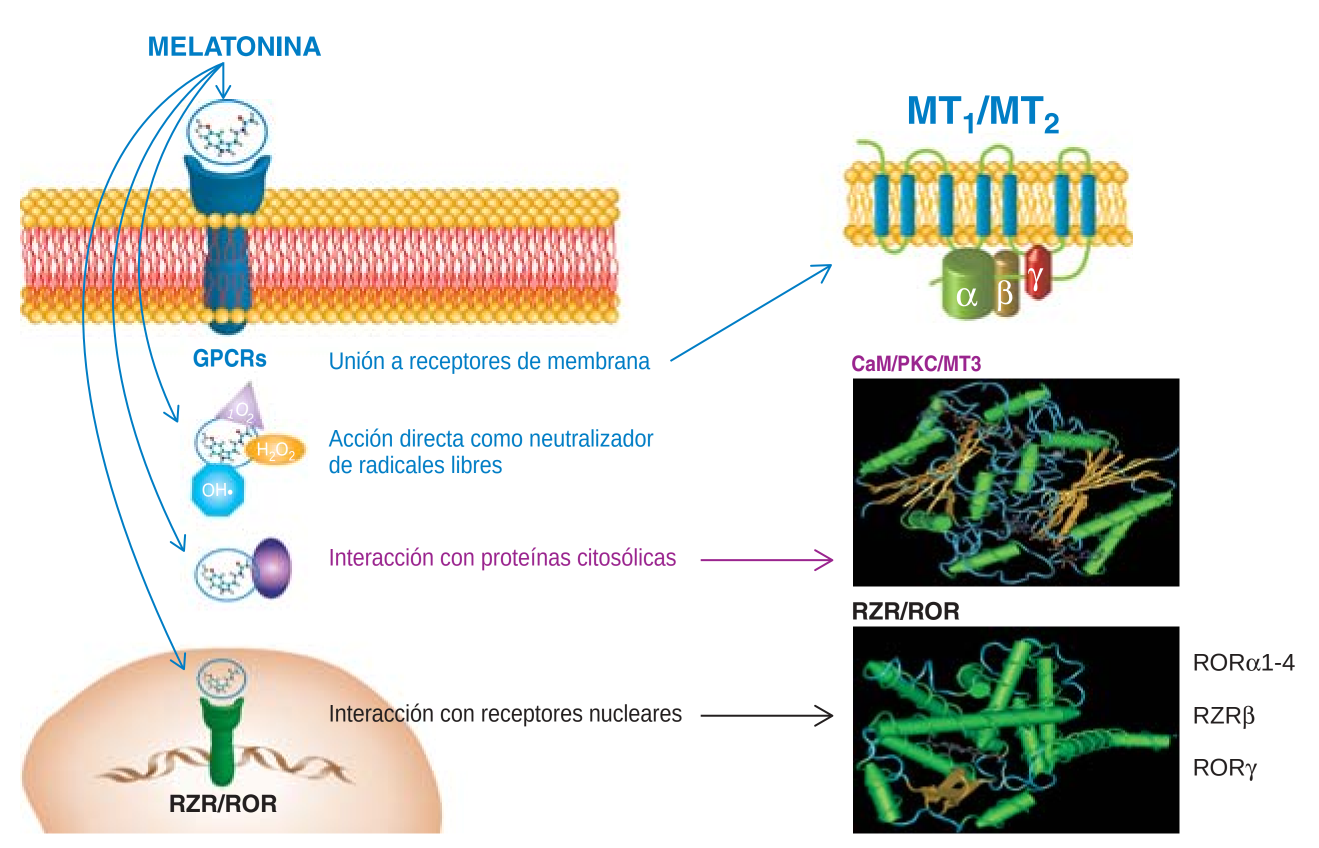
La melatonina como antioxidante

Según parece, la degeneración anatómica y funcional asociada al envejecimiento procede del daño producido por los radicales libres, en particular los radicales de oxígeno. Los radicales libres inactivan enzimas, dañan el ADN e inician una serie de reacciones en cadena que conducen a la peroxidación (degradación) de los lípidos de las membranas celulares. No es de extrañar que exista un sistema biológico de defensa. De entre los componentes de este sistema destacan los antioxidantes, como el glutatión (un agente reductor) y las vitaminas E y C, y las enzimas detoxificantes, entre ellas la superóxido dismutasa, la catalasa y la glutatión peroxidasa.

Los trabajos de Russel J. Reiter, de la Universidad de Texas en San Antonio, y otros han demostrado que la melatonina se comporta como un potente antioxidante. En particular, neutraliza el radical hidroxilo (OH^-), con una efectividad que multiplica por 5 y por 14 la del glutatión y la del manitol, respectivamente. Además, la hormona se ha mostrado efectiva en la neutralización del peróxido de hidrógeno, el singlete de oxígeno, el anión peroxinitrito, el radical peroxilo y el HClO. Por otra parte, la melatonina protege del daño oxidativo por vía indirecta, a través de la activación de las enzimas antioxidantes glutatión peroxidasa, glutatión reductasa, glucosa-6-fosfatodeshidrogenasa, catalasa y superóxido dismutasa; la potenciación del efecto de otros antioxidantes, como el glutatión y las vitaminas E y C; y el aumento en la eficacia de la cadena respiratoria, descrito por el grupo de Darío Acuña-Castroviejo, de la Universidad de Granada.

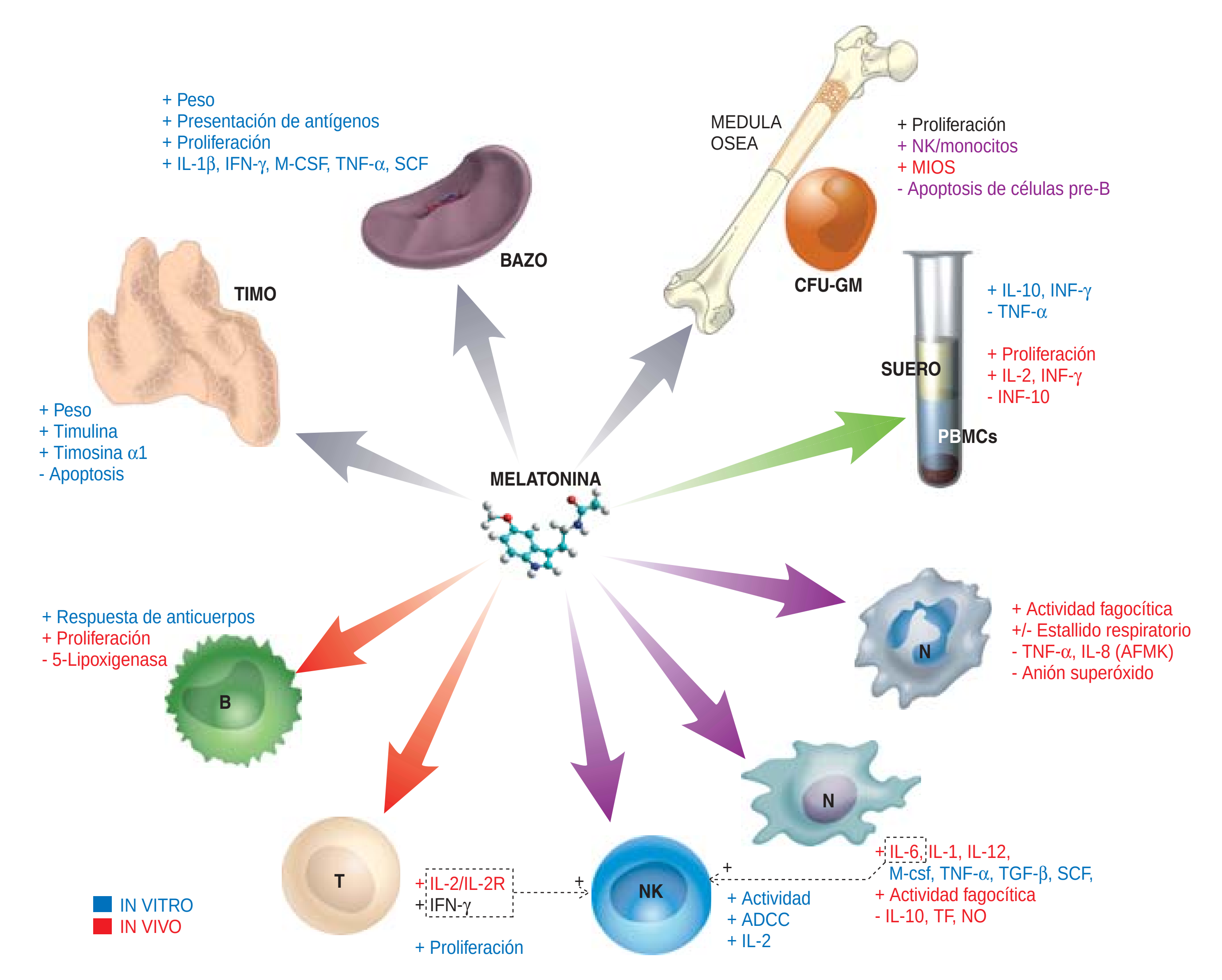
Mecanismos de acción de la melatonina

Se conocen cuatro mecanismos de acción a través de los cuales la melatonina ejerce sus diversas funcio-



6. LOS MECANISMOS DE ACCION de la melatonina son muy variados. Pocas moléculas han desarrollado tantos mecanismos en el curso de la evolución. Hay abundantes datos experimentales de los cuatro que se muestran en el diagrama. La melatonina puede unirse a receptores de la membrana plasmática. Sin embargo, su carácter lipofílico le permite entrar fácilmente en la célula e, incluso, llegar hasta el núcleo. Se han descrito receptores nucleares y proteínas citoplasmáticas que se unen a la melatonina, como es el caso de la calmodulina. Por último, dentro de las propiedades antioxidantes de la melatonina se ha descrito la capacidad que tiene de atrapar o neutralizar radicales hidroxilos. Estos radicales participan en la fisiopatología de enfermedades degenerativas que aparecen durante el envejecimiento. (GPCR, receptores acoplados a proteína G; CaM, calmodulina; PKC, proteína quinasa C; RZR/ROR, subfamilia de receptores retinoicos).

JUAN M. GUERRERO, ANTONIO CARRILLO-VICO Y PATRICIA J. LARDONE



7. UNA DE LAS FUNCIONES más interesantes de la melatonina es la regulación del sistema inmunitario. Lo han confirmado numerosos trabajos, en los cuales se ha estudiado el efecto de su administración sobre diversos parámetros inmunitarios, tanto en ensayos *in vivo* como *in vitro*. (MEL, melatonina; AFMK, N^1-acetil-N^2-formil-5-metoxiquinuramina; MIOS, sistema de opiáceos estimulados por melatonina; IFN-γ, interferón gamma; IL-2, interleucina 2; IL-6, interleucina 6; IL-1, interleucina 1; IL-8, interleucina 8; IL-10, interleucina 10; IL-12, interleucina 12; TNF-α, factor de necrosis tumoral; SCF, factor de crecimiento de células progenitoras; TGF-β, factor de crecimiento transformante beta; NO, óxido nítrico; ROI, radicales de oxígeno; T, linfocitos T; B, linfocitos B; NK, células *natural killer*; N, neutrófilos; ADCC, citotoxicidad celular dependiente de anticuerpos; CFU-GM, colonias formadoras de granulocitos y macrófagos; PBMCs, células mononucleares de sangre periférica).

JUAN M. GUERRERO, ANTONIO CARRILLO-VICO Y PATRICIA J. LARDONE

nes en los mamíferos. Así, se une a los receptores de membrana MT_1 y MT_2, pertenecientes a la superfamilia de "receptores de 7 dominios transmembrana acoplados a proteínas G". Dada la facilidad con que atraviesa la membrana plasmática, puede interaccionar directamente sobre proteínas citosólicas como la calmodulina, la proteína quinasa C y la proteína MT_3, o bien puede actuar sobre radicales libres. Se sabe de su acción a través de receptores nucleares pertenecientes a la familia RZR/ROR.

Receptores

Los primeros estudios que mostraron la existencia de sitios de unión de la melatonina se llevaron a cabo mediante ensayos con el radioligando 2-yodomelatonina, un potente agonista de la melatonina. Determinaron su localización anatómica, que varía de una especie a otra, y se descubrió su afinidad por el radioligando en el sistema nervioso central, la hipófisis y la retina. Otros sitios donde se une la hormona son los sistemas gastrointestinal, cardiovascular e inmunitario, el hígado, el pulmón y la próstata, células sanguíneas y de granulosa. Se han clonado ya tres receptores de membrana de la melatonina: los receptores MT_1, MT_2 y Mel 1c. Los receptores MT_1 y MT_2 presentan un 60 % de homología en su secuencia de aminoácidos. El MT_1 consta de 350 aminoácidos y el MT_2 de 362, mientras que el Mel1c presenta 420.

El primer indicio de una posible interacción de la melatonina con material del núcleo celular se obtuvo al encontrarse una concentración elevada de hormona asociada a la cromatina. El tratamiento de los

núcleos con proteasas, enzimas que digieren proteínas, impidió la captación de melatonina; daba a entender una probable unión de la hormona a proteínas nucleares. Posteriormente, mediante el uso de radioligandos, se identificaron sitios de unión específicos y de alta afinidad para la melatonina en núcleos de hígado, linfocitos y timocitos (linfocitos precursores de las células T, creados en el timo). Nuestra hormona ejerce sus efectos por medio de receptores nucleares de la subfamilia de los receptores retinoicos RZR/ROR. Hasta la fecha los únicos ligandos descritos para estos receptores son la melatonina y compuestos pertenecientes a la familia de las tiazolidindionas, que actúan como análogos de la melatonina. Así, el CGP 52608 ejerce como agonista de la melatonina, mientras que el CGP 55644 lo hace como antagonista.

La expresión de los miembros de la subfamilia muestra una gran variabilidad entre tejidos. Las isoformas RORα se expresan en un gran número de tejidos. Intervienen en la inhibición de la 5-lipoxigenasa, un mediador antiinflamatorio, y en un aumento en los niveles de las IL-2 y 6, inducidos por la melatonina. La expresión de RZRβ es la más restringida; se la detecta casi exclusivamente en estructuras del sistema nervioso central implicadas en el procesamiento de la información sensorial y en el sistema de sincronización circadiano. El RORγ presenta una amplia distribución, mientras que su variante RORγ-t (TOR) es específica del sistema inmunitario.

Interacción con proteínas citoplasmáticas

Varios trabajos llevados a cabo en los años noventa por los grupos de Fernando Antón Tay, de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa de México, y Gloria Benítez King, del Instituto Mexicano de Psiquiatría, mostraron que la melatonina interaccionaba con proteínas del citosol. En ese sentido, podía revertir el efecto inhibitorio de la calmodulina sobre la polimerización de microtúbulos e inducir una redistribución de la proteína hacia la membrana. Además, podía inhibir la enzima óxido nítrico sintasa cerebelar de la rata y la proteína quinasa dependiente de calcio/calmodulina por medio de un mecanismo en el que participa la calmodulina.

Otras funciones reseñables de la hormona son su activación directa de la quinasa C alfa, amén de promover su redistribución celular y la reorganización de filamentos intermedios. La unión de melatonina a la proteína quinasa C insta la fosforilación de calmodulina y su posterior redistribución citosólica. La hormona también puede regular la presión intraocular en los conejos e inhibir la adhesión leucocitaria uniéndose al receptor MT_3 (la enzima quinona reductasa 2).

Neutralización de radicales libres

La vida se desarrolló y se desarrolla en un medio en el que la agresión por radicales de oxígeno es constante. Por ello, desde el mismo principio de la vida, las células tuvieron que adquirir mecanismos de protección. Por otro lado, la melatonina se encuentra muy repartida por los reinos vegetal y animal, así como por organismos unicelulares muy primitivos. Su función en estos organismos se desconoce, pero resulta atractiva la idea de que guarde relación con la actividad antioxidante. Cabe, pues, imaginar que la función antioxidante constituyera la misión originaria de la hormona, para ir luego ampliando su rango de acción.

La glándula pineal y la melatonina, su principal secreción, están ya integradas en el sistema endocrino. Sin embargo, tanto por las incipientes muestras de su síntesis extrapineal como por sus múltiples funciones, la hormona se integra también en los sistemas neuroinmunitario y neuroinmunoendocrino. El reto para el futuro cercano consiste en llegar a saber si, a la luz de los nuevos datos conocidos, la melatonina participa en algunos procesos fisiopatológicos (envejecimiento, cáncer, alteraciones del sistema inmunitario, etc.) y si se la podrá utilizar para la prevención o tratamiento de algunos de estos procesos.

Los autores

Juan M. Guerrero es responsable de un grupo de investigación que ha elucidado las bases moleculares de la regulación por la melatonina exógena y endógena del sistema inmune. Es catedrático de bioquímica y biología molecular de la facultad de medicina de la Universidad de Sevilla y Jefe del Servicio de Bioquímica Clínica del Hospital Universitario Virgen del Rocío. **Antonio Carrillo Vico** pertenece al grupo de investigación dirigido por Guerrero y ha llevado a cabo los estudios que han mostrado la síntesis endógena de melatonina en el sistema inmune y sus efectos fisiológicos. Es profesor del departamento de bioquímica médica y biología molecular de la facultad de medicina de la Universidad de Sevilla. **Patricia Judith Lardone** se licenció en biología en el año 2002 en la Universidad de Córdoba (Argentina) y posteriormente comenzó su doctorado en el departamento de bioquímica médica y biología molecular de la facultad de medicina de la Universidad de Sevilla. Desde finales de 2002 pertenece al grupo de investigación de Guerrero.

Bibliografía complementaria

Generation of the Melatonin Endocrine Message in Mammals: A Review of the Complex Regulation of Melatonin Synthesis by Norepinephrine, Peptides, and Other Pineal Transmitters. V. Simmoneaux y C. Ribelayga en *Pharmacological Reviews*, vol. 55, págs. 325-395; 2003.

Melatonin Receptors and their Regulation: Biochemical and Structural Mechanisms. P. A. Witt-Enderby, J. Bennett, M. J. Jarzynka et al. en *Life Sciences*, vol. 72, págs. 2183-2198; 2003.

Pharmacological Utility of Melatonin in Reducing Oxidative Cellular and Molecular Damage. R. J. Reiter, D. X. Tan, E. Gitto et al. en *Polish Journal of Pharmacology and Pharmacy*, vol. 56, , págs. 159-170; 2004.

Evidence of Melatonin Synthesis by Human Lymphocytes and Its Physiological Significance: Possible Role as Intracrine, Autocrine, and/or Paracrine Substance. A. Carrillo Vico, J. R. Calvo, P. Abreu et al. en *FASEB Journal*, vol. 18, págs. 537-539; 2004.

A Review of the Multiple Actions of Melatonin on the Immune System. A. Carrillo Vico, J. M. Guerrero, P. J. Lardone et al. en *Endocrine*, vol. 27, págs. 189-200; 2005.

Melatonin: Nature's Most Versatile Biological Signal? S. R. Pandi-Perumal, V. Srinivasan, G. J. Maestroni et al. en *FEBS Journal*, vol. 273, págs. 2813-2838; 2006.

Hervé This

Estabilización de espumas

¿Ayuda a la formación de espuma una pizca de sal en la clara de huevo? ¿O quizás un poco de zumo de limón? ¿Tiene importancia el material del cazo donde se baten las claras? Todas las afirmaciones que se oyen acerca del punto de nieve merecen una comprobación experimental. En la Universidad de Wageningen, Erik van der Linden y sus colaboradores han averiguado por qué son más estables las claras que se han batido a punto de nieve en un cazo de cobre, un fenómeno harto comprobado.

La clara de huevo está compuesta por un 90 por ciento de agua y un 10 por ciento de proteínas, o cadenas de aminoácidos. En el agua de la clara de huevo, las proteínas, que constan de segmentos hidrófobos alternantes con segmentos hidrófilos, se arrollan en ovillo, de suerte tal que las zonas hidrófobas se sitúan en el interior del ovillo y las zonas hidrófilas en la superficie, en contacto con el medio acuoso.

Las burbujas que se forman cuando se agita agua pura con un batidor estallan de inmediato. Las que se forman en una clara de huevo, en cambio, persisten. El movimiento del batidor segmenta las proteínas e insta con ello su desmadejamiento parcial: coloca las partes hidrófobas en contacto con el aire del interior de las burbujas y las partes hidrófilas en contacto con el agua circundante. Se genera entonces una espuma frágil, aunque con estabilidad suficiente para la mayoría de los usos culinarios.

Los quimiofísicos de Wageningen midieron la estabilidad de las claras de huevo, batidas en presencia y en ausencia de iones de cobre. Para ello, colocaron las espumas sobre unos embudos de cristal sinterizado, recogieron el líquido drenado y después lo pesaron. El resultado no ofrece dudas: las claras batidas a punto de nieve en presencia de cobre liberan su agua unas dos veces más despacio que las claras batidas sin cobre.

¿Qué mecanismo subyace bajo este fenómeno? Puesto que el tiempo de batido escogido en un comienzo no era necesariamente el que daba a la espuma su máxima estabilidad, van der Linden repitió el experimento doblando la velocidad de batido. Esta vez, la diferencia entre las claras batidas con y sin cobre se agrandó más: en presencia de cobre, no se recogió nada de líquido durante los 10 minutos siguientes al batido.

La estabilidad de una espuma depende de la viscosidad de la fase líquida y de las fuerzas de superficie. Por eso, los químicos repitieron los experimentos diluyendo la clara de huevo. Obtuvieron los mismos efectos estabilizantes. De lo que se desprendía que el cobre ejercía un afecto mayor sobre la interfase agua-aire que sobre la masa del líquido. Resultado que cabía esperar, puesto que los iones cobre, dotados de carga eléctrica, forman complejos con ciertas proteínas de la clara de huevo como la conalbúmina (llamada también ovotransferrina, porque se une a los iones hierro en los sistemas biológicos).



© iStockphoto/ANNE CLARK

¿Se modifica el tamaño de las burbujas de la espuma con la creación de los complejos? La observación microscópica de las espumas no muestra ningún cambio estructural en las claras a punto de nieve con cobre. Debe tratarse de efectos más sutiles. Pensemos, por ejemplo, en la posibilidad de que los iones cobre modifiquen las propiedades superficiales.

Una de esas propiedades es la tensión superficial, es decir, la energía que se necesita para aumentar el área de la interfase entre un líquido y un gas. Si las claras forman espuma cuando se baten a punto de nieve es porque las proteínas reducen la tensión superficial entre el agua y el aire. Podría pensarse que el cobre, al unirse a las proteínas, modifica esa energía; sin embargo, los experimentos no revelaron ninguna diferencia entre las muestras con cobre o las muestras sin él.

Faltaba comprobar otras características superficiales: la elasticidad y la viscosidad, propiedades que describen el modo en que una interfase reacciona frente a las perturbaciones, sobre todo cuando se aumenta y restringe de forma periódica su área mediante un anillo vibrador.

Los quimiofísicos descubrieron que, cuando las muestras sin cobre se sometían a perturbaciones de frecuencias bajas (las que destruyen las burbujas que hay alrededor), presentaban un módulo de elasticidad superficial inferior al de las muestras con cobre. Sus burbujas, al ser más rígidas, se conservaban mejor. Ese efecto se explica por la formación, ya observada, de complejos entre los iones cobre y las moléculas de conalbúmina que se hallan distribuidas en red por la superficie de las burbujas de aire de la clara. En conclusión: el efecto es el siguiente: el cobre estabiliza la espuma dando rigidez a la “piel” de las burbujas.



Rosa Isabel Figueroa y Esther Garcés

Microalgas tóxicas

En organismos superiores, proliferar es sinónimo de sexo. Dejar descendencia pasa inevitablemente por encontrar una pareja que asegure la perpetuación de nuestro capital genético. Sin embargo, algunos organismos utilizan en ocasiones mecanismos de reproducción asexual que les permiten un crecimiento más rápido a un coste energético menor. Ese es el caso de las microalgas tóxicas, las causantes de las proliferaciones algales masivas o “blooms”.

Un gran número de especies de microalgas presentan dos fases en su ciclo biológico: una libre (vegetativa), que se encuentra nadando en el mar, y otra bentónica e inmóvil (quiste), que se forma por fusión sexual de dos células vegetativas y tarda de 1 a 6 meses en germinar. Si las condiciones en la columna de agua son apropiadas para el crecimiento asexual, se produce la germinación simultánea de los quistes acumulados para dar lugar a una nueva proliferación.

La reproducción sexual ofrece a las microalgas tóxicas numerosas ventajas. Favorece la adaptación rápida a nuevas condiciones ambientales mediante la recombinación sexual, la generación de variabilidad genética y facilita la supervivencia en el sedimento cuando las condiciones en la columna de agua son adversas. Asimismo, resulta idónea para la expansión de la especie, puesto que los quistes sexuales son muy resistentes y pueden ser transportados hasta largas distancias, ya sea por las corrientes o adheridos a la superficie de los barcos.

1. Proliferación algal en una playa de Mallorca.

2. *Gymnodinium catenatum*.
Tras la división asexual por mitosis,
se forma una cadena de dos células.



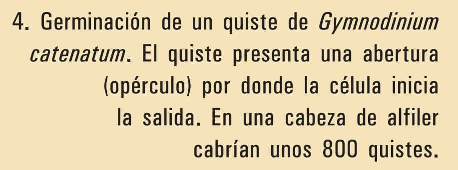






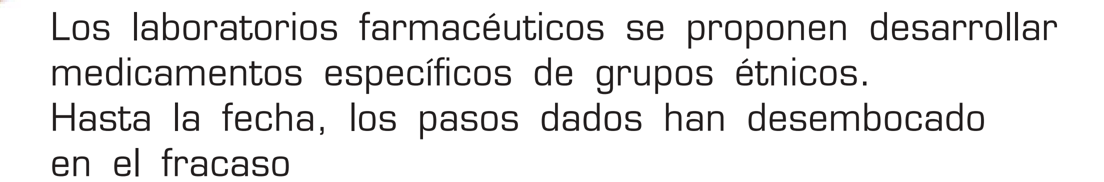
3. Formación de un quiste sexual en *Alexandrium taylori*. Dos gametos se unen (*a*). Uno de ellos engulle al otro para formar el zigoto móvil (*b*), que se caracteriza por poseer dos flagelos, en lugar de uno (*c*). El zigoto formará luego el quiste de resistencia (*d*).





4. Germinación de un quiste de *Gymnodinium catenatum*. El quiste presenta una abertura (opérculo) por donde la célula inicia la salida. En una cabeza de alfiler cabrían unos 800 quistes.

¿Fármacos raciales?



Los laboratorios farmacéuticos se proponen desarrollar medicamentos específicos de grupos étnicos. Hasta la fecha, los pasos dados han desembocado en el fracaso

Jonathan Kahn

Conceptos básicos

- BiDil, un fármaco que combate la insuficiencia cardíaca congestiva mediante la dilatación de las arterias y las venas, fue aprobado en 2005 como tratamiento sólo para negros.
- No existen pruebas de que BiDil muestre mayor eficacia en negros que en blancos.
- BiDil es una combinación de dos medicamentos genéricos, que se venden a una sexta parte del precio del fármaco supuestamente racial.
- Aunque BiDil puede retrasar la hospitalización y la muerte de pacientes con insuficiencia cardíaca, la aprobación específica de raza del fármaco sienta un precedente poco prudente.

El 23 de junio de 2005, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense (FDA) aprobó el BiDil, el primer medicamento "étnico". Estaba concebido para tratar la insuficiencia cardíaca congestiva en los negros norteamericanos. Ese mal consiste en el debilitamiento progresivo del corazón hasta el punto de no poder bombear sangre.

Se repitió con profusión que la aprobación suponía un gran paso hacia una nueva era de la medicina personalizada, una era en la que los fármacos estarían diseñados para actuar sobre el perfil genético de cada individuo.

La farmacogenómica, así se llama esa línea de investigación, promete una reducción de costes y un incremento de la seguridad y la eficacia de los nuevos tratamientos. BiDil se acogió también como una forma de mejorar la salud de los negros norteamericanos, quienes reciben una atención deplorable por parte de los profesionales del sector médico. La Asociación de Cardiólogos Negros y el Sector Negro del Congreso apoyaron firmemente la aprobación del fármaco.

Pero si examinamos detenidamente la historia de BiDil, descubrimos que lo que tiene de étnico es puro barniz. En primer lugar, BiDil no es un medicamento nuevo, sino la combinación de dos fármacos genéricos en un comprimido. La hidralacina y el dinitrato de isosorbide, los fármacos de marras, se han venido administrando durante más de un decenio para el tratamiento de insuficiencias cardíacas en personas de todas las razas. Segundo, BiDil *no* corresponde a un medicamento farmacogenómico. Aunque los estudios hayan demostrado que la combinación de hidralacina/dinitrato de isosorbide (H/I) demora la hospitalización y la muerte en los pacientes que sufren de fallo cardíaco, no se comprende todavía el mecanismo de operación del fármaco, que no guarda relación directa con ningún gen específico. Tercero, y más importante, no existe ninguna prueba de que BiDil funcione mejor, o de forma distinta, en negros estadounidenses que en cualquier otro grupo.

La FDA basó la aprobación de ese fármaco en un ensayo clínico en el que participaron sólo sujetos que se identificaron a sí mismos como afroamericanos, sin que los resultados se compararan con los de individuos de otros grupos raciales o étnicos.

¿Cómo llegó, pues, BiDil a ser considerado medicamento étnico y precursor de una nueva era de la medicina? La historia del desarrollo de ese fármaco



1. LA APROBACION DE BiDil como tratamiento para la insuficiencia cardíaca congestiva en negros estadounidenses ha alentado el desarrollo de otras medicinas destinadas a grupos raciales o étnicos. Sin embargo, según la mayoría de los expertos, el criterio racial no resulta válido para predecir una respuesta farmacológica, dado que las diferencias genéticas entre individuos de la misma raza son mayores que entre razas.

es un galimatías de estudios inconclusos, obstáculos administrativos y motivaciones comerciales. Pese a su escaso impacto en el mercado (se ha vendido sólo por valor de unos pocos millones de dólares en los dos últimos años), BiDil ha demostrado el peligro que entraña la utilización de criterios raciales en la aprobación de nuevos productos farmacéuticos. Si bien los negros estadounidenses mueren de cardiopatías y otras enfermedades a edades más tempranas que los blancos, suele atribuirse su muerte prematura al resultado de un complejo despliegue de fuerzas sociales y económicas [*véase* "Pobreza y enfermedad", por Robert Sapolsky; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; febrero 2006].

Algunos médicos y expertos en políticas gubernamentales, sin embargo, presentan BiDil como prueba de que esas diferencias en mortalidad tienen una causa genética. Lo que es peor: hay laboratorios farmacéuticos que recurren a ese argumento falaz para continuar con otros tratamientos destinados a varios grupos étnicos, una tendencia que puede fomentar la segregación médica y multiplicar los beneficios de las compañías farmacéuticas, olvidando las causas que subyacen bajo la muerte prematura de tantos estadounidenses de raza negra.

El nacimiento de BiDil

La historia de BiDil comenzó hace 20 años, con un par de estudios diseñados para evaluar los efectos de los fármacos vasodilatadores en la insuficiencia cardíaca, una enfermedad debilitante y, en última instancia, letal, que afecta a millones de estadounidenses. Hasta entonces, los médicos trataban la insuficiencia cardíaca mediante diuréticos (para reducir la acumulación de fluidos que resulta del bombeo inadecuado) y digoxina (para aumentar la contracción del músculo cardíaco). No disponían de más armamentario.

A principios de 1980, Jay Cohn, de la Universidad de Minnesota, planteó la hipótesis de que la administración de dos vasodilatadores, la hidralacina y el dinitrato de isosorbide, aliviaba la tensión de los corazones debilitados a través de la relajación de arterias y venas. Junto con la Administración de Veteranos estadounidense, Cohn diseñó y llevó a cabo dos ensayos para la comprobación de su idea.

El primer ensayo demostró que la combinación de hidralacina y dinitrato de isosorbide (H/I) ofrecía mejores resultados que un placebo y que el prazosín, un fármaco que se usa para tratar la hiperpresión. En el segundo ensayo se comparó la combinación H/I con el enalapril, un inhibidor de la enzima convertidora de la angiotensina (ECA) de primera generación. (Los inhibidores de la

AARON GOODMAN (*fotoilustración*); JEN CHRISTIANSEN (*píldoras*)

Cronología del desarrollo de BiDil

1986: Se publican los resultados del primer ensayo vasodilatador de insuficiencia cardíaca. La combinación de hidralacina y dinitrato de isosorbide (H/I) parece prometedora.

1987: Jay Cohn, de la Universidad de Minnesota, solicita la patente del procedimiento de utilización conjunta de hidralacina y dinitrato de isosorbide. Nace BiDil.

1991: Un segundo ensayo muestra que enalapril, un inhibidor de la enzima convertidora de la angiotensina, es más eficaz que H/I en el tratamiento de la insuficiencia cardíaca.



PRIMERA PATENTE

1996: Cohn y Medco, que poseen los derechos de la patente de BiDil, solicitan de la FDA la aprobación del fármaco.

ECA relajan la presión sanguínea mediante el control de la producción de péptidos de efecto vasoconstrictor.) El enalapril resultó ser más eficaz que H/I para el tratamiento de la insuficiencia cardíaca. A partir de ese momento, los inhibidores de la ECA se convirtieron en la terapia de primera línea para pacientes con insuficiencia cardíaca. Los médicos empezaron a recomendar hidralacina y dinitrato de isosorbide —ambos disponibles en forma de genéricos y, por tanto, más económicos— para los que no respondían bien a los inhibidores de la ECA.

Con todo, Cohn se mantuvo firme en la idea de desarrollar un tratamiento que combinara la hidralacina y el dinitrato de isosorbide. Creía en su efectividad. En 1987, solicitó una patente para el *procedimiento* de utilización conjunta de los dos fármacos para el tratamiento de la insuficiencia cardíaca, en cualquier individuo, independientemente de su raza. (No podía conseguir la patente del medicamento combinado en sí porque ambos fármacos estaban ya disponibles en forma de genérico.) Cedió entonces los derechos de la patente a Medco, una pequeña compañía farmacéutica de Carolina del Norte, que a principios de 1990 se propuso reunir la combinación H/I en una sola tableta. Así nació BiDil.

Medco y Cohn solicitaron la aprobación de BiDil a la FDA en 1996. A principios de 1997, la agencia rechazó la solicitud. Por ironía de las cosas, la mayoría de los médicos de la comisión de la FDA recomendaron la aprobación de BiDil, pues confiaban en su eficacia. El problema no residía en el fármaco, sino en los resultados de los ensayos de Cohn, que no estaban diseñados para cumplir los requerimientos de la FDA, sino para demostrar que los vasodilatadores podían tratar la insuficiencia cardíaca. Tras la denegación, las acciones de Medco cayeron en picado más del 20 por ciento; la compañía revirtió a Cohn los derechos de la patente. Para 1997, ya se habían cumplido la mitad de los 20 años de vida de la patente del BiDil original, lo que explicaría la renuencia de Medco a invertir más dinero en el fármaco.

El primer fármaco racial

Fue entonces cuando la raza entró en escena. Después de que la FDA denegara la aprobación de BiDil, Cohn volvió a los resultados de sus ensayos de 1980; desglosó los datos por razas, para examinar la respuesta de los negros. Una revisión retrospectiva de los resultados permite profundizar en la investigación, pero está sembrada de peligros estadísticos. Si el número de participantes en cada categoría es reducido, los resultados para los subgrupos pueden carecer de relevancia. Cohn sostenía que la combinación H/I funcionó bien en los negros que habían participado en los estudios. El apoyo más claro de semejante declaración provenía del primer ensayo, en el que H/I se administró sólo a 49 sujetos negros, un número minúsculo si tenemos en cuenta que en ese tipo de pruebas suelen participar cientos de voluntarios.

En 1999 Cohn publicó un artículo en el *Journal of Cardiac Failure* sobre esa hipotética diferencia racial. Solicitó entonces una nueva patente: era casi idéntica a la primera, con la salvedad de que especificaba el uso de H/I para tratar la insuficiencia cardíaca en pacientes negros. La nueva patente se registró en 2000 y vige hasta 2020, 13 años más que la patente original. Así es como BiDil se reinventó en forma de medicamento étnico.

Con la patente específica de raza en la mano, Cohn cedió los derechos de propiedad intelectual a NitroMed, una empresa de Massachusetts. La FDA dio entonces a NitroMed el visto bueno para llevar a cabo el ensayo de insuficiencia cardíaca en negros, un pequeño estudio en el que participaron 1050 sujetos que se identificaron a sí mismos como afroamericanos. A la mitad de los pacientes con insuficiencia cardíaca se les administró BiDil; a la otra mitad, un placebo. Al mismo tiempo, los pacientes de ambos grupos continuaron el tratamiento que ya se les había recetado para la insuficiencia cardíaca (alrededor del 70 por ciento tomaban inhibidores de la ECA).

Para sorpresa de muchos, se obtuvieron unos resultados positivos: la tasa de mortalidad de los sujetos que tomaron BiDil fue un 43 por ciento menor que la del grupo placebo. BiDil parecía tan eficaz, que el Comité de Seguridad y Seguimiento de Datos suspendió antes de lo previsto el ensayo, en julio de 2004, para ofrecer el fármaco también a los sujetos del grupo placebo. El valor de las acciones de NitroMed se triplicó en los días posteriores. El mes de junio siguiente, la FDA aprobó BiDil como medicamento específico de raza: el prospecto indicaba que su administración estaba indicada para pacientes negros.

Pero los expertos tienen buenas razones para creer en la eficacia de BiDil en pacientes caucásicos. Es más, en opinión del propio Cohn, el fármaco debería funcionar en personas de todas las razas. Entonces, ¿por qué se ensayó el fármaco sólo en un grupo étnico? La respuesta parece responder a motivos comerciales, no científicos. Si la FDA hubiera aprobado BiDil para el público en general, la protección de la patente para el fabricante del fármaco habría expirado en 2007. Al restringir el

CORTESIA DE LA UNIVERSIDAD DE HAMLINE (*Kahn*); JEN CHRISTIANSEN (*píldoras*)

1997: La FDA rechaza BiDil porque los datos de los ensayos clínicos no cumplen la regulación estándar para su aprobación.

1999: Cohn solicita una nueva patente que especifica el uso de H/I para el tratamiento de insuficiencia cardíaca en negros.

2000: Se aprueba la nueva patente específica de raza de BiDil.

2001: NitroMed, que posee los derechos de BiDil, empieza a ensayar el fármaco en negros.

SEGUNDA PATENTE

2004: Los resultados muestran que BiDil retrasa la hospitalización y la muerte de la población negra estudiada.

2005: La FDA aprueba BiDil como tratamiento para afroamericanos.

2007: EXPIRA LA PRIMERA PATENTE

2020: → EXPIRA LA SEGUNDA PATENTE

ensayo clínico a pacientes negros se maximizaban las posibilidades de que la FDA aprobara el uso racial de BiDil, lo que concedía a NitroMed una prórroga de 13 años para vender sin competencia el combinado H/I.

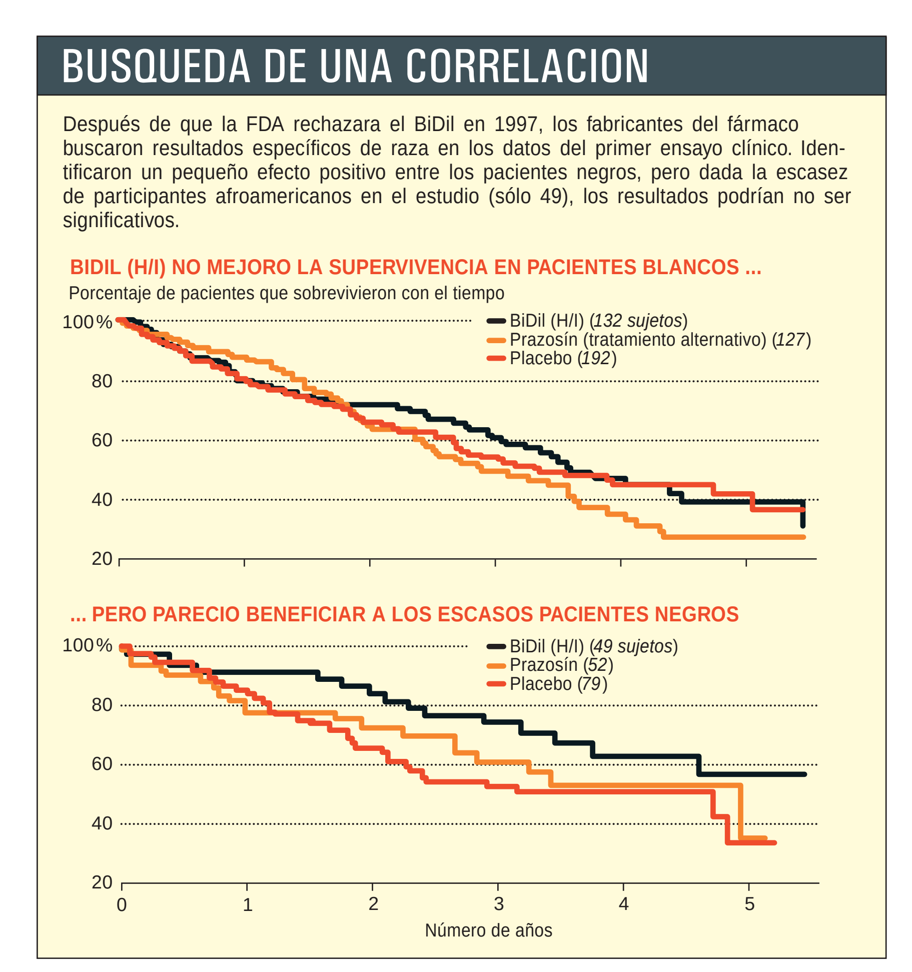
Segregación médica

En el progreso de la medicina, han ido de la mano siempre la ciencia y los negocios. Pero en el caso de BiDil, parece que se ha perdido el equilibrio. No cabe duda de que Cohn y los demás expertos implicados en el desarrollo del fármaco desean mejorar la salud de quienes sufren de insuficiencia cardíaca. En ese sentido, la aprobación de BiDil es, sin duda, positiva. Pero Cohn y NitroMed han utilizado la raza también para obtener beneficios comerciales. El fármaco patentado sextuplica el precio de los genéricos equivalentes. Los precios elevados han hecho ya que un gran número de aseguradoras se muestren reacias a ofrecer cobertura para BiDil; puede que el fármaco quede fuera del alcance de los millones de estadounidenses que carecen de seguro médico. Además, el tratamiento que los medios han hecho de la especificidad racial del fármaco puede hacer pensar a médicos y pacientes que el medicamento no resulta indicado para individuos de raza distinta de la negra, cuando, de hecho, podría prolongarles la vida.

Quizá lo más preocupante es que la concesión de la patente y la aprobación de BiDil por la FDA suponen el visto bueno del gobierno federal para el uso de la raza como categoría genética. Desde el inicio del Proyecto Genoma Humano, los científicos han trabajado para asegurar que el conocimiento biológico que revelan las investigaciones en genética no se utilice de forma inapropiada, en el sentido de hacer que las categorías raciales de construcción social parezcan biológicas o naturales. Hay más variación genética entre dos individuos de la misma población que entre poblaciones distintas; el concepto de *raza* carece de base biológica.

La raza constituye sólo un débil indicador de las causas ambientales y genéticas que determinan la enfermedad o la respuesta a un medicamento. Agrupar a las personas en compartimentos raciales sería equivalente a agrupar mapaches, tigres y ocapis en una misma categoría zoológica porque todos tienen rayas.

La FDA fundó la aprobación del BiDil en el argumento de NitroMed: el fármaco debía estar indicado sólo para negros, dado que el ensayo se había llevado a cabo con una población afroamericana. De ese enunciado se desprende el mensaje, no demostrado científicamente, de que la raza constituye una variable biológica significativa para valorar la seguridad y eficacia de BiDil. La mayoría de los fármacos del mercado se han ensayado en poblaciones mayoritariamente blancas, pero no por ello denominamos a esos medicamentos "blancos", ni debemos hacerlo. La



Después de que la FDA rechazara el BiDil en 1997, los fabricantes del fármaco buscaron resultados específicos de raza en los datos del primer ensayo clínico. Identificaron un pequeño efecto positivo entre los pacientes negros, pero dada la escasez de participantes afroamericanos en el estudio (sólo 49), los resultados podrían no ser significativos.

LUCY READING-IKKANDA (*línea temporal y gráficas*); FUENTE DE LAS GRAFICAS: "RACIAL DIFFERENCES IN RESPONSE TO THERAPY FOR HEART FAILURE: ANALYSIS OF THE VASODILATOR-HEART FAILURE TRIALS", POR PETER CARSON, SUSAN ZIESCHE, GARY JOHNSON Y JAY N. COHN EN *JOURNAL OF CARDIAC FAILURE*, VOL. 5, N.º 3; SEPTIEMBRE DE 1999

FDA admite, de forma implícita, que un fármaco que resulta eficaz para blancos es bueno para todos; la misma premisa debería aplicarse cuando la población del ensayo es negra. De no ser así, la FDA estaría insinuando que los negros son menos representativos de la especie humana que los blancos.

En noviembre de 2004, Sarah K. Tate y David B. Goldstein, del Colegio Universitario de Londres, publicaron en *Nature Genetics* un artículo titulado "Will Tomorrow's Medicines Work for Everyone?" (¿Valdrán las medicinas de mañana para todos?). El trabajo apuntaba la existencia de 29 medicamentos (o combinaciones de ellos) para los que se habían sugerido grados distintos de seguridad o eficacia según el grupo étnico o racial.

Pero la prensa no tardó en proclamar que el estudio respaldaba la hipótesis de la diferencia biológica entre razas. Según *Los Angeles Times*, el informe mostraba una relación de 29 fármacos que se *sabe* que presentan distinta eficacia en las dos razas. El *Times* aseguraba que la investigación del Colegio Universitario de Londres *mostraba* que 29 medicinas tenían un perfil de seguridad o eficacia que variaba en función del grupo étnico o racial. Un editorial del *New York Times*, titulado "Hacia la primera medicina racial", comenzaba con un debate sobre BiDil y continuaba declarando que algunos cálculos indicaban que había 29 medicinas cuya eficacia variaba según el grupo racial. Se daba a entender que podrían aparecer más medicamentos específicos de raza.

Todos esos artículos periodísticos tergiversaban el estudio publicado en *Nature Genetics*. Tate y Goldstein explicaban que las diferencias raciales en la seguridad o eficacia del fármaco sólo se habían sugerido, no que se hubieran demostrado. Asimismo, advertían que se trataba de reivindicaciones controvertidas y que *no* existe *consenso* sobre la importancia de la raza o etnia en la evaluación de un fármaco.

Sólo en cuatro de los 29 medicamentos identificados, Tate y Goldstein encontraron indicios de que las diferencias genéticas entre razas pudieran estar relacionadas con las distintas respuestas farmacológicas. (Los cuatro corresponden a betabloqueantes utilizados para tratar la hipertensión y otros trastornos cardiovasculares; algunas investigaciones indican que esos fármacos muestran mayor eficacia en individuos portadores de una variante génica más común en personas de ascendencia europea que en afroamericanos.)

En nueve de los fármacos, los autores descubrieron una explicación fisiológica razonable de por qué negros y blancos responderían

ASI COMBATE BIDIL LA INSUFICIENCIA CARDIACA

Un corazón enfermo, al contrario que el de una persona sana, se dilata al bombear sangre, con lo que produce una acumulación de fluido en los alvéolos pulmonares. BiDil está pensado para ralentizar el progreso de ese trastorno mediante la dilatación de los vasos sanguíneos estrechos, lo que alivia la carga del corazón.

Corazón y pulmones sanos ▸

Aorta
Aurícula izquierda
Alvéolos
Aurícula derecha
Ventrículo derecho
Ventrículo izquierdo

Insuficiencia cardíaca congestiva ▸

Alvéolos llenos de fluido
Ventrículos dilatados
Fluido
Paredes ventriculares delgadas

Constricción de los vasos sanguíneos ▸

La constricción de arterias y venas dificulta el bombeo de la sangre, lo que provoca una tensión adicional en el corazón. El óxido nítrico (NO) relaja los vasos, pero los radicales libres como el superóxido (O_2^-) contrarrestan su influencia beneficiosa.

NO
O_2^-
Sangre
Células musculares contraídas
Dinitrato de isosorbide
Hidralacina

◂ Mecanismo propuesto para BiDil

BiDil se compone de dinitrato de isosorbide, que aumenta la producción de NO, e hidralacina, que impide la formación de superóxido. Los vasos sanguíneos se dilatan al recibir más NO; ello facilita al corazón el bombeo de sangre a través de ellos.

Células musculares relajadas

TAMI TOLPA

de forma distinta al medicamento. Por ejemplo, algunos expertos han especulado que los inhibidores de la ECA pueden mostrar mayor eficacia en personas de ascendencia europea que en afroamericanos por diferencias en la actividad de la enzima. (Otros investigadores han refutado esa hipótesis.)

Para cinco de los fármacos, Tate y Goldstein no encontraron factores fisiológicos que explicaran la variedad de resultados. A propósito de los 11 restantes, llegaron a la conclusión de que los informes sobre diferencias en las respuestas podrían no ser válidos.

Injusticia racial

Aun así, aumenta la demanda de fármacos específicos de raza. En 2003 VaxGen, una compañía biofarmacéutica de California, se propuso, sin éxito, utilizar un análisis retrospectivo de subgrupos raciales para salvar la vacuna del sida AIDSVAX. Aunque el ensayo clínico para AIDSVAX no mostró descenso en la tasa de infección VIH en el conjunto de la población de estudio, VaxGen alegó una reducción notable de la infección en los participantes negros y asiáticos. Pero el número de negros y asiáticos que participaron en el estudio fue de escasos centenares, lo que significa que un manojo de infecciones podrían haber sesgado los resultados.

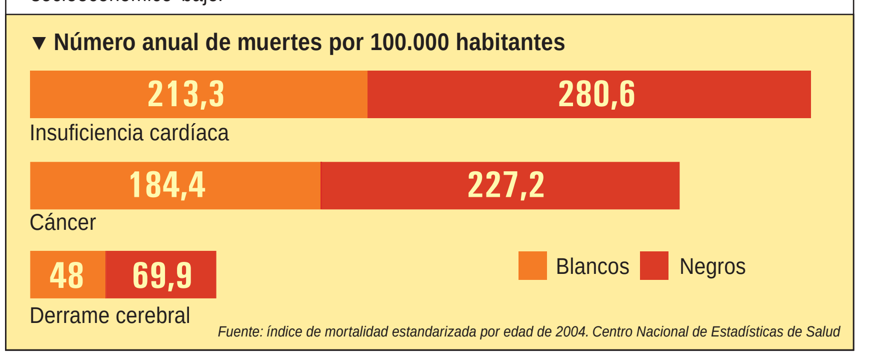
La pretensión de que existía una respuesta específica de raza perdió fuerza más tarde, ese mismo año, cuando otro ensayo realizado en Tailandia mostró la ineficacia de AIDSVAX. Un caso parecido ocurrió con AstraZeneca. Según esa empresa farmacéutica británica, Iressa, su fármaco para el cáncer de pulmón, había mostrado mayor eficacia en asiáticos, en un ensayo clínico llevado a cabo en 2004 en el que el medicamento no mejoró los índices de supervivencia generales. (No convencida, la FDA cambió la calificación de Iressa, prohibiendo su uso a partir de entonces.) En fecha más reciente, AstraZeneca ha realizado ensayos con negros, surasiáticos e hispanos de los Estados Unidos para la evaluación de Crestor, un fármaco reductor del colesterol que proporciona beneficios multimillonarios a la empresa. Los grupos de consumidores mantienen que Crestor es menos seguro que otros fármacos que reducen el colesterol, pero AstraZeneca afirma que los estudios específicos de raza demuestran la seguridad y eficacia del mismo.

No negamos la buena intención que guiara a los investigadores que se basaban en criterios raciales para el desarrollo de fármacos, pero se trata de esfuerzos que no podemos disociar de las exigencias de un mercado farmacéutico cada vez más competitivo. El ejemplo de BiDil indica que investigadores y reguladores no son del todo conscientes de que la raza constituye una categoría poderosa y volátil. Usada para reafirmar el valor comercial de un fármaco puede llevar a una regulación caprichosa, a un tratamiento médico de inferior calidad y a otras consecuencias desafortunadas.

La FDA no debería aprobar medicamentos específicos de raza sin la prueba clara y convincente de una base genética o biológica que demuestre que la eficacia y seguridad del medicamento varían según la etnia. La aprobación de nuevos fármacos como BiDil no aliviará las serias desigualdades raciales que se producen en el sistema sanitario estadounidense. Para reparar esa injusticia necesitamos voluntad política y social, no medicinas mal etiquetadas.

LA SALUD EN BLANCO Y NEGRO

En EE.UU., las enfermedades cardíacas, el cáncer y el derrame cerebral presentan mayor incidencia en la población negra que en la blanca. Aunque esas afecciones constituyen las primeras causas de mortalidad para ambas razas, el índice de mortalidad estandarizada por edad es superior en los afroamericanos, es decir, mueren a edades más tempranas debido a esas enfermedades. Se han propuesto varias teorías para explicar las diferencias reseñadas. Unos expertos culpan a la falta de acceso a los servicios sanitarios; otros lo achacan al estrés que produce tener un estatuto socioeconómico bajo.



LUCY READING-IKKANDA

El autor

Jonathan Kahn enseña en la facultad de derecho de la Universidad Saint Paul en Minnesota. Es doctor en historia de EE.UU. por la Universidad de Cornell y doctor en derecho por la de California en Berkeley. Centra su investigación en la interrelación entre derecho, raza y genética.

Bibliografía complementaria

COMBINATION OF ISOSORBIDE DINITRATE AND HIDRALAZINE IN BLACKS WITH HEART FAILURE. Anne L. Taylor et al. en *New England Journal of Medicine,* vol. 351, págs. 2049-2057; 11 noviembre 2004.

HOW A DRUG BECOMES "ETHNIC": LAW, COMMERCE, AND THE PRODUCTION OF RACIAL CATEGORIES IN MEDICINE. Jonathan Kahn en *Yale Journal of Health Policy, Law, and Ethics,* vol. 4, págs. 1-46; 2004.

FROM DISPARITY TO DIFFERENCE: HOW RACE-SPECIFIC MEDICINES MAY UNDERMINE POLICIES TO ADDRESS INEQUALITIES IN HEALTH CARE. Jonathan Kahn en *Southern California Interdisciplinary Law Journal,* vol. 15, págs. 105-129; 2005.

ENHANCED: RACE AND REIFICATION IN SCIENCE. Troy Duster en *Science*, vol. 307, págs. 1050-1051; 18 febrero 2005.



UN TIBURON GALANO se zampa a un desgraciado pez.

ELECTROSENSIBILIDAD EN LOS TIBURONES

Merced a un refinado sistema de detección de campos eléctricos, los tiburones se dirigen con precisión hacia sus presas

R. Douglas Fields

Una aleta amenazadora apareció de repente en la superficie. Cortaba el agua mientras se nos acercaba. Un poderoso tiburón azul (de tres metros de longitud) se dirigía como un torpedo hacia el olor de la sangre. Mientras Melanie (mi esposa) y yo observábamos a varios tiburones imponentes que rondaban nuestra embarcación (una ballenera de Boston, de siete metros de eslora), un hocico de un azul plateado nos sorprendió a través de un orificio cuadrado que había en la cubierta. "¡Cuidado!", gritó Melanie. Aunque no corríamos peligro, ambos retrocedimos instintivamente. El tiburón nos dirigió una sonrisa de dientes marfileños y aserrados, y volvió a sumergirse.

Habíamos captado la atención de los tiburones mediante vertido de sangre al océano. Pero lo que nos interesaba de tales depredadores no era su conocida atracción por la sangre, sino su misterioso "sexto sentido". Se había demostrado (en el laboratorio) que los tiburones perciben campos eléctricos sumamente débiles, como los que producen las células animales cuando están en contacto con el agua de mar. Pero se desconocía el modo en que operaba ese extraño sentido. Nos encontrábamos allí para descubrirlo.

Hasta los años setenta, nadie sospechaba siquiera la existencia de tal capacidad de los tiburones para percibir campos eléctricos débiles. Hoy sabemos que estos peces se sirven de la electrorrecepción para buscar comida. Opera incluso cuando las condiciones ambientales inutilizan los sentidos comunes (vista, olfato, gusto, tacto y oído): en aguas turbias, en total oscuridad y cuando la presa se halla escondida bajo la arena.

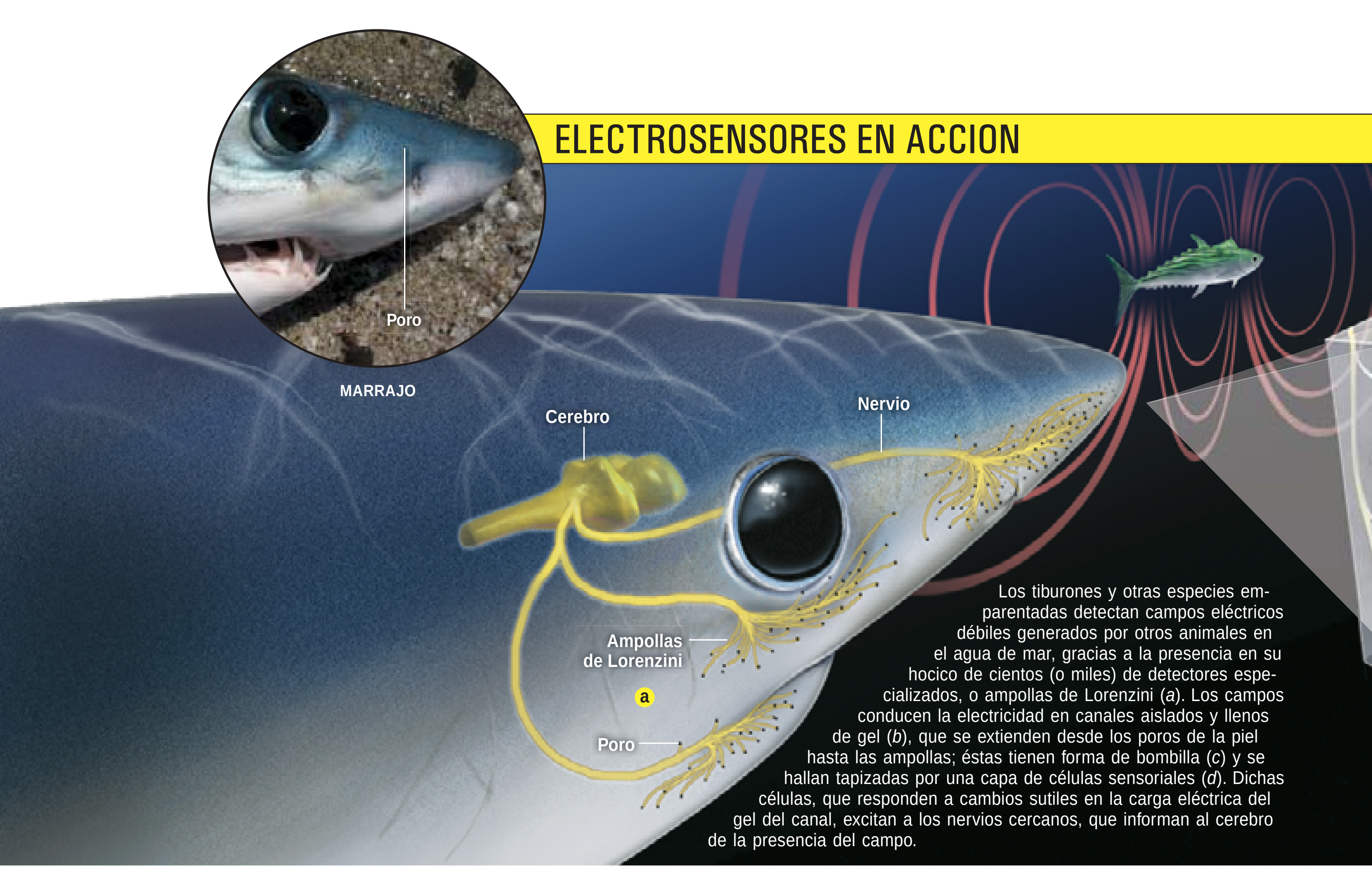
Nuestra investigación se centra en la base molecular de esa capacidad. Otros grupos estudian el desarrollo embrionario del órgano electrorreceptor o investigan si nuestros antepasados vertebrados pudieron detectar alguna vez campos eléctricos antes de que abandonaran el mar. Se trata, sin embargo, de estudios preliminares. Expondremos aquí la historia del descubrimiento de la electrorrecepción

Conceptos básicos

- Los tiburones y peces con ellos emparentados detectan campos eléctricos extremadamente débiles, emitidos por animales en el agua circundante, un sentido que pocos organismos poseen.
- Deben esa capacidad a unas estructuras electrosensoriales únicas, las ampollas de Lorenzini, así denominadas por el anatomista del siglo XVII que las descubrió.
- Los tiburones utilizan ese "sexto sentido" para dirigirse hacia la presa durante la fase final del ataque. Quedan por determinar otras funciones de la electrorrecepción.

BRANDON COLE

ELECTROSENSORES EN ACCION



Los tiburones y otras especies emparentadas detectan campos eléctricos débiles generados por otros animales en el agua de mar, gracias a la presencia en su hocico de cientos (o miles) de detectores especializados, o ampollas de Lorenzini (*a*). Los campos conducen la electricidad en canales aislados y llenos de gel (*b*), que se extienden desde los poros de la piel hasta las ampollas; éstas tienen forma de bombilla (*c*) y se hallan tapizadas por una capa de células sensoriales (*d*). Dichas células, que responden a cambios sutiles en la carga eléctrica del gel del canal, excitan a los nervios cercanos, que informan al cerebro de la presencia del campo.

AMADEO BACHAR

en los tiburones, así como la investigación que nos permitió demostrar su importancia para la caza.

Un sentido oculto

La historia de este descubrimiento empieza en 1678, cuando el anatomista Stefano Lorenzini describió unos poros que punteaban la parte anterior de la cabeza de tiburones y rayas, como el rostro de quien se deja barba de dos días. Los poros se concentraban alrededor de la boca del tiburón; al arrancar la piel circundante, descubrió que cada abertura conducía a un largo tubo transparente y lleno de un gel cristalino. Algunos tubos eran pequeños y delicados; otros, en cambio, presentaban un diámetro de varios milímetros y longitud de centímetros. A una distancia notable en el interior de la cabeza, Lorenzini observó que los tubos se congregaban en masas voluminosas de gelatina transparente. Consideró la posibilidad —que luego rechazó— de que esos poros fueran el origen del mucus corporal de los peces. Más tarde especuló sobre la posibilidad de que los poros desarrollaran otra función “oculta”, pero su misión real se ignoró durante siglos.

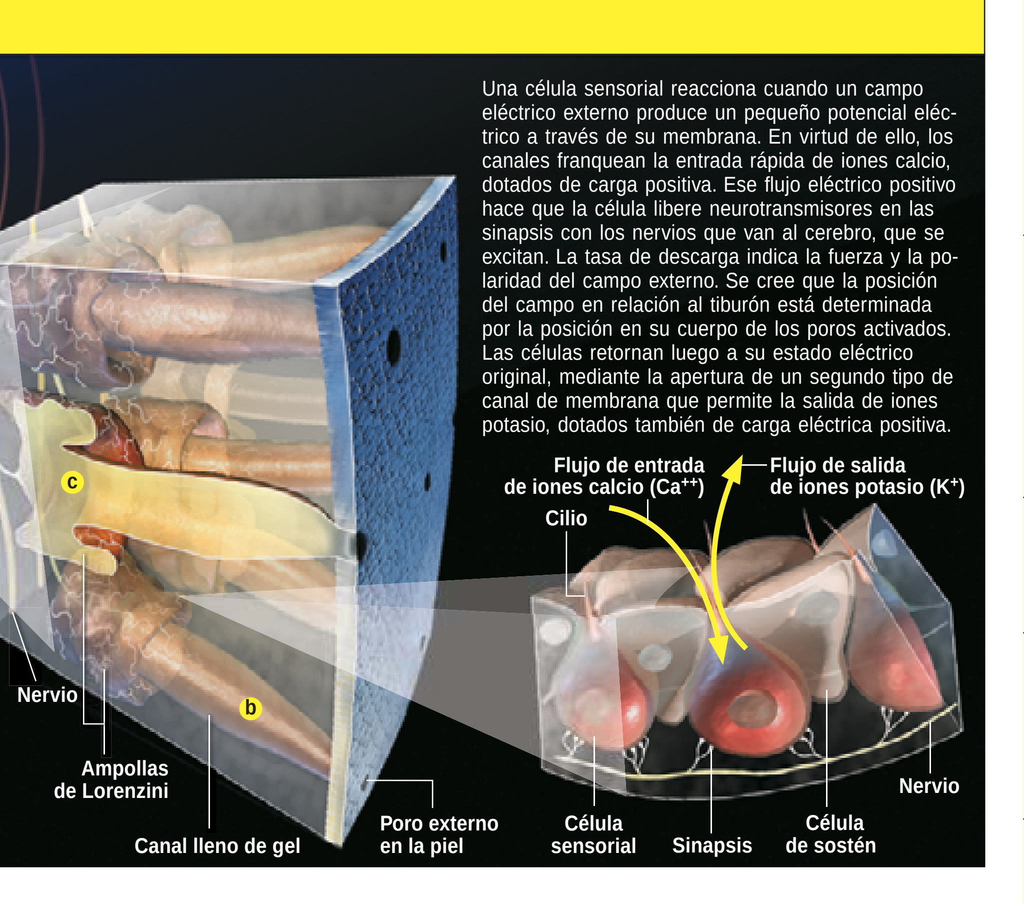
La función de los poros empezó a aclararse mediado el siglo XIX, a raíz del descubrimiento de la función de la línea lateral, un órgano que guarda semejanza con el sistema de poros y tubos de Lorenzini. La línea lateral, una banda que se extiende, desde las branquias hasta la cola, a lo largo de los costados de numerosos peces y anfibios, detecta el desplazamiento del agua.

En los peces, la línea lateral consta de una hilera de escamas perforadas y especializadas; cada una se abre en un tubo que se extiende longitudinalmente por debajo de la piel. En engrosamientos a lo largo de dicha longitud, hay determinadas células sensoriales (células ciliadas) que extienden protuberancias filiformes (cilios) en el tubo. Basta unos movimientos ligeros del agua, como los que causan los peces que nadan a pocos decímetros de distancia, para que se doblen las masas ciliares, lo mismo que las ondulaciones creadas por el viento en un trigal. Esa reacción provoca la excitación de los nervios, que informan al cerebro sobre la intensidad y la dirección del desplazamiento del agua. Los humanos conservamos el descendiente de esa línea lateral en la cóclea.

A finales del siglo XIX, el recién mejorado microscopio óptico reveló que los poros del hocico de un tiburón y las insólitas estructuras situadas bajo éstos —hoy denominadas ampollas de Lorenzini— debían corresponder a algún tipo de órgano sensorial. Se veía que cada tubo terminaba en una bolsa bulbosa o ampolla. Un fino nervio surgía de la ampolla y se unía a ramas del nervio anterior de la línea lateral. Los científicos siguieron la pista de esas fibras nerviosas hasta la base del cráneo; penetraban en el cerebro a través de la superficie dorsal de la médula, destino característico de los nervios que portan información sensorial al encéfalo. Identificaron en el interior de cada ampolla una célula ciliada, única y minúscula, similar a las del oído interno humano y a las del sistema de la línea lateral de los peces. Sin embargo, seguía sin conocerse el tipo de estímulo que esas células podían detectar.

Electrorrecepción confirmada

Los expertos se enfrentaban a un reto: ¿Cómo determinar la función



Una célula sensorial reacciona cuando un campo eléctrico externo produce un pequeño potencial eléctrico a través de su membrana. En virtud de ello, los canales franquean la entrada rápida de iones calcio, dotados de carga positiva. Ese flujo eléctrico positivo hace que la célula libere neurotransmisores en las sinapsis con los nervios que van al cerebro, que se excitan. La tasa de descarga indica la fuerza y la polaridad del campo externo. Se cree que la posición del campo en relación al tiburón está determinada por la posición en su cuerpo de los poros activados. Las células retornan luego a su estado eléctrico original, mediante la apertura de un segundo tipo de canal de membrana que permite la salida de iones potasio, dotados también de carga eléctrica positiva.

de un órgano sensorial tan extraño? La solución surgiría de la combinación de una buena instrumentación y una imaginación fértil.

En 1909, G. H. Parker, de la Universidad de Harvard, arrancó la piel en torno a las aberturas ampollares de una pintarroja, para eliminar todos los receptores táctiles del área. Observó luego que, a pesar de ello, el pez reaccionaba cuando se rozaban suavemente los tubos expuestos. De ello se infería que los órganos quizá sentían el movimiento del agua o la presión hidrostática. Pero Parker no estaba tan seguro; después de todo, una reacción refleja ante un golpe en el ojo no significa que los ojos hayan evolucionado para percibir golpes repentinos.

De la misma manera que los microscopios habían abierto nuevas vías de investigación un siglo antes, los amplificadores de tubo de vacío, recién inventados, hicieron avanzar el estudio de la función cerebral en el segundo cuarto del siglo XX. En 1938, Alexander Sand, de la Estación Biológica Marina de Plymouth, consiguió amplificar y registrar impulsos nerviosos que viajaban de las ampollas de Lorenzini al cerebro. Comprobó que los impulsos recorrían el nervio en un flujo constante, si bien determinados estímulos hacían que el ritmo aumentara o disminuyera de forma repentina.

Sand advirtió, como antes Parker, que los órganos respondían al tacto y a la presión, pero encontró que la tasa de descarga aumentaba también cuando aquéllos se enfriaban. De hecho, las ampollas mostraban una sensibilidad térmica exquisita: detectaban cambios del orden de 0,2 grados Celsius. Esa discriminación tan fina, junto con la reconocida importancia de la temperatura del agua para la migración y otros comportamientos de los peces, parecían indicios claros de que esos órganos correspondían a receptores térmicos.

A principios de los años sesenta del siglo pasado, R. W. Murray, de la Universidad de Birmingham, repitió los experimentos de Sand con instrumentos electrofisiológicos modernos. Confirmó las respuestas a los cambios térmicos, diferencias de presión y tacto; asimismo, observó que los órganos mostraban una ligera sensibilidad a las variaciones de salinidad.

DESCUBRIMIENTO DE LA ELECTRORRECEPCION

1678: Stefano Lorenzini describe la estructura del sistema de electrorrecepción de tiburones y rayas. Su función es un misterio.

Finales del siglo XIX: Se descubre la función de la línea lateral de los peces, órgano que detecta el desplazamiento del agua y guarda semejanza con el sistema de electrorrecepción. El examen microscópico revela los detalles de lo que pronto se conocerá como ampollas de Lorenzini.

1909: G. H. Parker descubre que las ampollas responden al tacto. Lanza la idea de que podrían sentir el movimiento del agua.

1938: Alexander Sand registra la producción de impulsos nerviosos en las ampollas de Lorenzini en respuesta a varios estímulos. Advierte que las ampollas muestran una sensibilidad térmica exquisita.

Años cincuenta: H. W. Lissmann y otros describen “receptores tuberosos” en peces eléctricos que perciben su propio campo. Se añade de la electrorrecepción a la lista de sentidos animales ya conocidos.

Inicios de los años sesenta: R. W. Murray encuentra que las ampollas de Lorenzini son sensibles a pequeñas variaciones de salinidad y a campos eléctricos débiles.

Años setenta: Adrianus Kalmijn determina que en el agua de mar los cuerpos animales producen campos eléctricos. Demuestra también que los tiburones cautivos localizan y atacan electrodos enterrados que emiten campos eléctricos similares a los de sus presas habituales

Años 1990 hasta la actualidad: Se demuestra que la electrorrecepción corresponde a un sentido antiguo que se halla muy extendido entre los animales acuáticos.

Además, cuando activaba un campo eléctrico cerca de la abertura del tubo conectado a una ampolla, el patrón de descarga cambiaba. Más aún, el patrón se alteraba según la intensidad y la polaridad del campo. Cuando el polo positivo del campo se acercaba

a la abertura de una ampolla, la tasa de descarga menguaba; cuando era el polo negativo el que se acercaba, aumentaban las descargas.

El hallazgo de Murray resultaba asombroso: las ampollas de Lorenzini respondían a campos del orden de una millonésima de volt, aplicados a través de un centímetro de agua de mar. Pero los experimentos de comportamiento y las mediciones de la respuesta cerebral posteriores indicaron que la sensibilidad de los tiburones era todavía mayor: detectaban campos equivalentes al gradiente de potencial que crearía una pila AA de 1,5 volt que tuviera un polo sumergido en Cádiz y el otro en aguas de Santa Cruz de Tenerife (0,01 millonésimas de volt por centímetro). No existe otro tejido, órgano o animal que exhiba una electrosensibilidad de un refinamiento equiparable. Los propios ingenieros, pese a contar con modernos equipos, tienen dificultades para medir en aguas oceánicas campos tan débiles.

La búsqueda de una función

¿Qué ganaban los peces con la detección de semejantes campos eléctricos? Las primeras pistas llegaron de estudios anteriores sobre “bioelectricidad” (emisión de campos eléctricos) en otros peces. Las anguilas eléctricas, por ejemplo, aturden a sus presas mediante fuertes sacudidas que genera un órgano especial. Otros peces, en cambio, producen campos eléctricos débiles, demasiado tenues para convertirlos en armas. La evolución de dichos órganos, en apariencia inútiles, desconcertó al mismo Charles Darwin, quien abordó ese enigma biológico en *El origen de las especies*.

En los años cincuenta, mientras buscaban la función de la bioelectricidad débil, H. W. Lissmann, de la Universidad de Cambridge, y otros investigadores descubrieron que los peces que la producían detectaban su propio campo eléctrico. Estaban dotados de sensores, o receptores tuberosos, muy distintos de las ampollas de Lorenzini: carecían de largos tubos y no eran tan sensibles a los campos eléctricos. Con todo, se añadió la electrorrecepción a la lista de los cinco sentidos tradicional.

Tomados en conjunto, los órganos eléctricos débiles y los electrorreceptores tuberosos forman el emisor y el receptor de un sistema parecido al radar, de suma eficacia para navegar por el fangoso Amazonas o para la depredación nocturna. Los objetos distorsionan la forma del campo eléctrico emitido; al detectar esa alteración, los receptores tuberosos revelan la ubicación de los objetos.

Sin embargo, tiburones y rayas carecen de órganos emisores de campos eléctricos. Los investigadores supusieron que las ampollas de Lorenzini, muy sensibles, podían operar como un sistema de “radar” pasivo que detectaría los campos eléctricos débiles que se producen de forma natural en el ambiente; algo parecido a las gafas para visión nocturna, que operan mediante la amplificación de la luz de las estrellas.

¿Qué detectaban, pues, esos animales? Posiblemente percibían formas breves y débiles de bioelectricidad: ondas cerebrales y potenciales de contracción del músculo cardíaco, por ejemplo. Pero parecía improbable que los tiburones pudieran usar sus ampollas de Lorenzini para detectar pulsos de campo eléctrico de milésimas de segundo. Muy al contrario, esos órganos se hallan ajustados para percibir sólo campos eléctricos de variación lenta, como los que generan las pilas electroquímicas.

Tamaña sensibilidad sí tendría sentido. En efecto, cuando un organismo se halla sumergido en aguas oceánicas, todas las células de su cuerpo operan como diminutas pilas. Una pila típica produce un voltaje cuando dos soluciones salina, portadoras de cargas eléctricas netas distintas, quedan separadas en el interior de una célula electroquímica. La atracción entre cargas de signo opuesto genera un movimiento de cargas: se crea así una corriente eléctrica. Las células contienen una solución salina cuya concentración difiere de la del agua de mar; ese gradiente iónico produce una diferencia de potencial en la interfase. En consecuencia, el cuerpo de un pez en el mar opera como una pila débil, que genera un campo eléctrico a su alrededor. El campo que produce esa pila cambia lentamente cuando el pez bombea agua a través de sus branquias.

En los años setenta del siglo pasado, Adrianus Kalmijn, entonces en la Universidad de Utrecht (hoy en la Institución de Oceanografía Scripps), demostró, mediante un amplificador electrónico, que los animales pro-

PECES CON UN SEXTO SENTIDO

Además de los tiburones, otros peces conocidos poseen electrorreceptores ampollares similares.

RAYAS Y PASTINACAS se deslizan mediante sus “alas” (aletas pectorales ensanchadas) hacia el fondo en busca de comida.

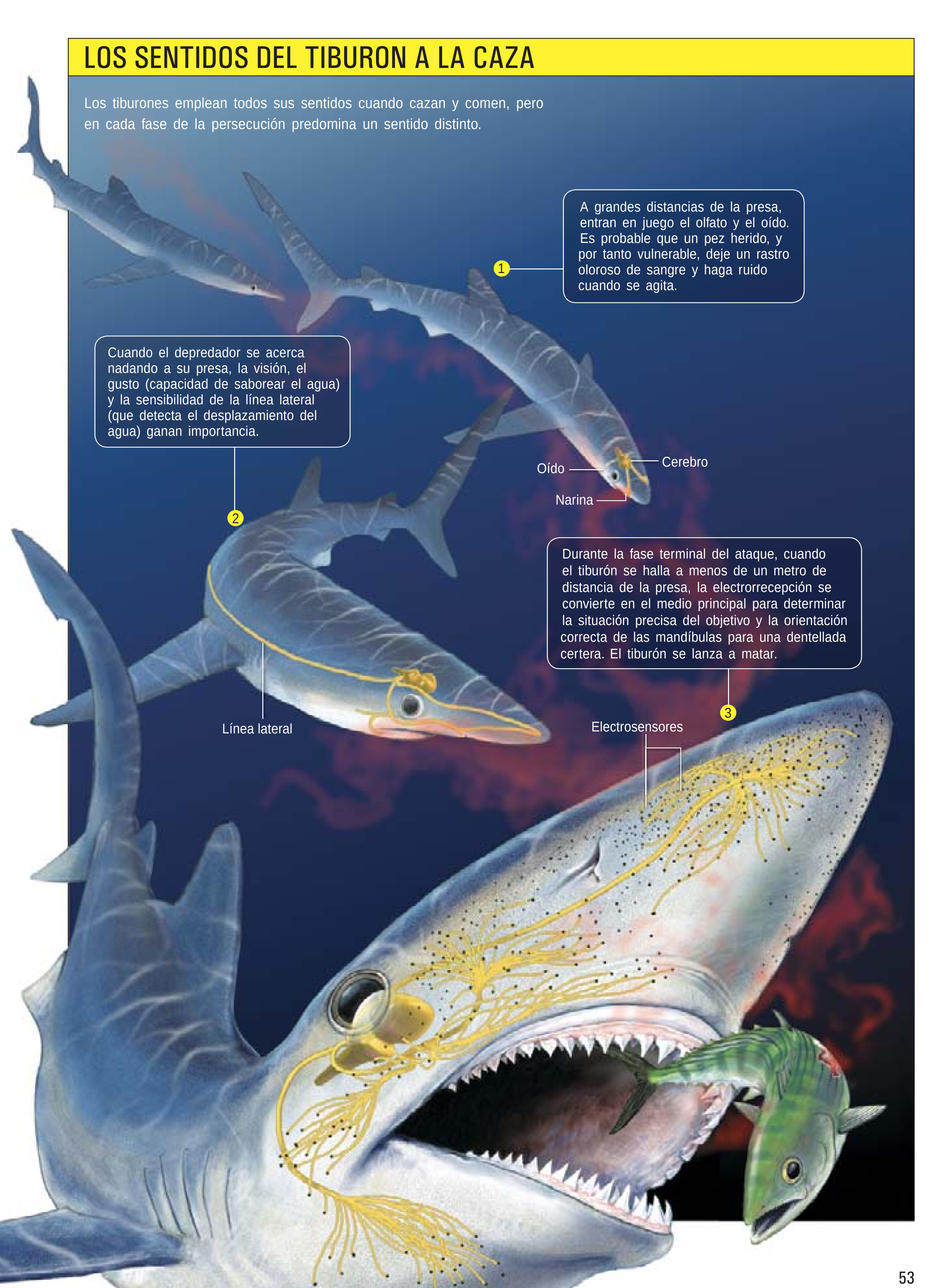
EL PEZ SIERRA posee un hocico serriforme y cubierto por poros sensibles al movimiento y a la electricidad; mediante esos sensores detecta presas enterradas en el fondo marino.

EL TORPEDO posee órganos que producen descargas eléctricas. Las utiliza para inmovilizar o matar a la presa.

EL ESTURION emplea su hocico en forma de cuña y sus sensibles barbillones en forma de bigotes para buscar comida en los sedimentos del fondo.

LOS PECES PULMONADOS respiran aire y están adaptados a vivir en agua dulce, a veces fangosa.

FRED BAVENDAM *Minden Pictures* (*raya*); NORBERT WU *Minden Pictures* (*pez sierra*); STEPHEN FRINK *Corbis* (*torpedo*); WIL MEINDERTS *Foto Natura/Minden Pictures* (*esturión*); JEAN-PAUL FERRERO *Auscape/Minden Pictures* (*pez pulmonado*)



AMADEO BACHAR

INVESTIGACION DE UN SENTIDO ANTIGUO

Los tiburones no fueron los primeros peces en poseer electrorreceptores. Sus antepasados, ahora extinguidos, detectaban campos eléctricos en mares antiguos. Mis primeras investigaciones en electrorrecepción se centraron en la quimera (holocéfalo), un peculiar habitante primitivo del mar profundo que también evolucionó a partir de aquellas especies desaparecidas.

Encontré por primera vez uno de esos animales de aspecto extraño a finales de los años setenta, en un pesquero de arrastre, cuando, tras licenciarme, trabajé en los Laboratorios Marinos de Moss Landing, en California. La quimera posee largos incisivos que impiden que su boca se cierre del todo. Eso, unido a sus grandes ojos, la asemejan a un conejo o a una rata, motivo por el cual se la denomina pez rata, pez conejo o pez gato.

Al estudiarla, advertí que toda la cabeza, entre la piel y el músculo subyacente, estaba llena de una masa gelatinosa transparente. Cuando iluminé la gelatina con un ángulo determinado, vi una maraña de tubos transparentes, llenos de gel, que radiaban hacia poros de la superficie de la cabeza; guardaban una estrecha semejanza con las ampollas de Lorenzini de los tiburones. Sospeché que también las quimeras poseían estos órganos; mas, para confirmarlo, necesitaba capturar una quimera indemne y mantenerla viva el tiempo suficiente para experimentar con ella.

Con este fin, solicité la ayuda de los pesqueros de la bahía de Monterrey. Una brumosa mañana, el *Holiday II* capturó una quimera viva. Llevada al laboratorio, la introduje en un acuario anular con circulación constante de agua *(esquema)*. Desde el centro del anillo, observaba el pez mientras nadaba contracorriente (su dirección preferida).

No tardé en percatarme de que esa tendencia de la quimera a nadar contracorriente podía dar respuesta a mis preguntas. Enterré electrodos bajo la arena. Cuando la quimera nadaba sobre los electrodos ocultos yo conectaba el campo eléctrico y, simultáneamente, daba leves golpecitos al pez con una varilla de vidrio, instándole a que nadara a favor de la corriente. La quimera invertía presto el rumbo, volviendo a su ruta preferida. Supuse que si el pez detectaba el débil campo eléctrico, llegaría a asociarlo con la varilla de marras. Aprendería así a darse la vuelta por sí sola cuando yo accionara el interruptor. De no producirse tal comportamiento, deduciría que el animal no sentía campos eléctricos débiles o bien que no podía ser adiestrado.

Tras un esfuerzo considerable, obtuve el resultado esperado. Al accionar el interruptor, la quimera cambió al instante de dirección. Había detectado el campo eléctrico y había deducido la rutina. Desde entonces, cada vez que yo aplicaba el estímulo eléctrico, la quimera se daba la vuelta; pero cuando el campo estaba desconectado, el animal pasaba sobre los electrodos sin vacilación. Mediante el ajuste de la intensidad y la frecuencia del campo eléctrico, descubrí que

LAS QUIMERAS, U HOLOCEFALOS, detectan el agua circundante mediante electrorreceptores. El fenómeno se demostró experimentalmente en un acuario anular (*esquema*).

detectaba campos tan débiles como los que emiten los peces en el océano.

El experimento demostró que la quimera detectaba campos eléctricos débiles, pero no que utilizara las estructuras de tipo de ampollas de Lorenzini con tal propósito. David Lange, de la Institución de Oceanografía Scripps, y yo nos preparamos para abordar la cuestión con la misma quimera. Aplicando el método empleado por Alexander Sand en 1938, registramos la actividad de los nervios conectados a esos órganos. Cuando un impulso nervioso corría desde el órgano misterioso hasta el cerebro, aparecía en la pantalla del osciloscopio un trazo ondulante verde fosforescente y desde un altavoz resonaba un fuerte chasquido.

Mientras el pez dormía bajo los efectos de la anestesia, las descargas del nervio pulsaban suavemente al ritmo de su respiración. Sin embargo, cuando situamos un campo eléctrico cerca de la abertura de uno de los poros de la piel, el laboratorio se llenó al instante de ruidosos chasquidos, reflejo de una corriente de impulsos nerviosos que salían disparados hacia el cerebro del pez. A continuación, aplicamos pulsos de campo eléctrico: los impulsos siguieron al unísono, cual soldados en desfile. Al invertir la polaridad del campo, demostramos que el polo negativo excitaba el órgano, mientras que el polo positivo inhibía su función, tal como R. W. Murray observó en las ampollas de los tiburones. No había ninguna duda: la quimera poseía electrorreceptores. El examen posterior reveló que los electrosensores de las quimeras eran idénticos a los de los tiburones.

NORBERT WU *Minden Pictures* (*quimera*); MELISSA THOMAS (*dibujo*)

ducían campos bioeléctricos en el agua de mar. Esos campos débiles cambiaban poco, si algo, con el tiempo, exactamente el tipo de rúbrica eléctrica que las ampollas de Lorenzini detectan. Kalmijn demostró, asimismo, que un tiburón cautivo localizaba y atacaba electrodos que habían sido enterrados en la arena de un acuario, si éstos emitían campos como los que producen las presas típicas del tiburón. [Mi trabajo inicial en electrorrecepción fue paralelo a la investigación de Kalmijn, si bien mi modelo animal era la quimera, emparentada con los tiburones].

Electrorrecepción en la naturaleza

Demostrar que los peces con ampollas de Lorenzini responden a los campos eléctricos en las condiciones controladas del laboratorio es una cosa; otra muy distinta es determinar si utilizan este sentido en su medio natural y la forma en que lo hacen. Alcanzarlo constituyó un auténtico desafío, debido en parte a las señales eléctricas débiles procedentes de una presa, que venían acompañadas por el ruido eléctrico que generaban otros fenómenos naturales (salinidad, temperatura, movimiento del agua, acidez, etcétera). En el océano, hasta un alambre metálico crea un voltaje que cualquier tiburón percibe sin problemas.

REPELENTES MAGNETICOS

Se están desarrollando dispositivos que alejen a los tiburones de los cebos de pesca y de los nadadores. Se basan en el uso de potentes imanes, que se interponen en la acción de los sensibles electrorreceptores de los peces. Se busca confundir los electrosensores del tiburón mediante la inducción de un voltaje interno cuando su cuerpo atraviesa el campo magnético.

Con ello se pretende salvar tiburones, no seres humanos, explica Samuel Gruber, de la Universidad de Miami. El Fondo Mundial para la Naturaleza estima que el 20 por ciento de las especies de tiburones están amenazadas. Si se fijaran a las redes de deriva comerciales, tales dispositivos podrían salvar diariamente a 50.000 tiburones de una captura irremediable.

Con el apoyo del Fondo Mundial para la Naturaleza, Gruber, Eric Stroud y Mike Herrmann están desarrollando un anzuelo con carnada con un potente imán (*cilindro negro, arriba*) fijado a la sotileza. Los peces que suelen pescarse con fines comerciales o deportivos, que carecen de electrorreceptores, morderán el anzuelo sin detectar el imán. Las pruebas preliminares arrojan resultados alentadores. Pero no se ha demostrado todavía el efecto que los imanes ejercen sobre el comportamiento de los tiburones.

ERIC STROUD Y MICHAEL HERMANN *Shark Defense*

Para comprobar el modo en que los peces usan esta capacidad sensorial en la naturaleza (cuando cazan, por ejemplo), debíamos observarlos *in situ*. Por ello nos hallábamos en aquella embarcación de fibra de vidrio (no metálica) con un orificio cuadrado taladrado en la cubierta. En 1981, confiando ver si los tiburones se basaban en la electrorrecepción durante su actividad normal de obtención de comida, Melanie y yo, así como Kalmijn y su colaboradora Gail Heyer, del Instituto Oceanográfico Woods Hole, desarrollamos un aparato en forma de T con juegos de electrodos situados en cada extremo.

Sumergimos el dispositivo a través del orificio de la cubierta; bombeamos peces triturados, que salían a través de una portilla situada en la juntura que unía los electrodos. Suministramos luego corriente a los electrodos para que produjeran campos eléctricos que remedaran los emitidos por los peces que suelen ser presa de los tiburones. Mientras una persona activaba un electrodo en una secuencia aleatoria, un segundo investigador (que no sabía qué electrodo estaba activado en un instante dado) observaba el efecto en los tiburones. Si los animales atacaban preferentemente el electrodo activado, sabríamos que utilizaban su sentido eléctrico para capturar presas.

Agazapados sobre la cubierta de la embarcación durante la primera noche de nuestro experimento, escudriñábamos a través del agujero. Un poderoso tiburón azul que rondaba la embarcación se excitó ante el olor de peces triturados que fluía del aparato. Nadó directamente hacia el olor; pero en el último momento, se desvió de pronto a la derecha, mordiendo con sus mandíbulas el extremo derecho de la T. El tiburón se estremeció; sacudió el aparato y lo soltó luego con brusquedad. En el momento final del ataque, el depredador ignoró la fuente de olor: se desvió para morder el electrodo activado.

A lo largo del verano presenciamos numerosos episodios de ataque; los animales mostraban una preferencia clara por el electrodo activado, frente al inactivo y a la fuente de olor a comida.

El efecto "pantalla" de la electrorrecepción, que en el momento final del ataque anula las intensas señales sensoriales del gusto y el olfato, podría explicar ciertos comportamientos intrigantes, observados durante el ataque de tiburones a seres humanos. Se ha informado de casos en los que la víctima fue acometida repetidamente por el tiburón mientras la intentaba salvar otro nadador, al que el escualo ignoraba. Aunque un tiburón pierda la pista de su víctima inicial cuando la sangre oscurece la visión y el olfato, parece que su sentido de electrorrecepción le permite localizar el potente campo eléctrico que se genera por las sales de la sangre que mana de las heridas.

Cuando caza, el tiburón emplea todos sus sentidos. Cada uno de ellos ofrece ventajas y sensibilidades distintas. El olfato y el oído serían los más útiles para la localización de presas a larga distancia. La visión, el sentido de la línea lateral y el gusto ganarían importancia a distancias menores. En cambio, durante la fase terminal del ataque, cuando el tiburón se encuentra a un metro de la presa, la electrorrecepción se convierte en el sistema de mayor utilidad para la localización precisa del objetivo y la orientación correcta de las mandíbulas. Ese descubrimiento quizás inspire algún día el desarrollo de un dispositivo que aleje a los tiburones de los nadadores.

Nosotros nos hemos centrado en el comportamiento alimentario, porque su estudio en los tiburones no entraña grandes dificultades. Pero sin duda esos peces utilizan la electrosensibilidad para otros cometidos. Sólo podemos imaginar cómo debe ser ver el mundo a través de ese sentido extraño y totalmente ajeno.

El autor

R. Douglas Fields es neurobiólogo en el norteamericano Instituto Nacional de la Salud. Posee una maestría de los Laboratorios Marinos de Moss Landing, en California. Obtuvo un doctorado en oceanografía biológica por la Institución de Oceanografía Scripps. Para sus estudios sobre tiburones cuenta con la colaboración de su esposa, Melanie Fields, profesora de secundaria de biología.

Bibliografía complementaria

THE ELECTRIC SENSE OF SHARKS AND RAYS. A. J. Kalmijn en *Journal of Experimental Biology*, vol. 55, págs. 371-383; 1971.

ELECTRORECEPTION IN THE RATFISH (*HYDROLAGUS COLLIEI*). R. D. Fields y G. D. Lange en *Science*, vol. 207, págs. 547-548; 1980.

AMPULLARY SENSE ORGANS, PERIPHERAL, CENTRAL AND BEHAVIORAL ELECTRORECEPTION IN CHIMAERAS (*HYDROLAGUS*, HOLOCEPHALI, CHONDRICHTHYES). R. D. Fields, T. H. Bullock y G. D. Lange en *Brain, Behavior and Evolution*, vol. 41, págs. 269-289; 1993.

ELECTRORECEPTION. T. H. Bullock, C. D. Hopkins, A. N. Popper y R. R. Fay. Springer, 2005.

GLACIARES DEL KILIMANJARO

El casquete de hielo del Kibo retrocede por efecto de la radiación solar

Philip W. Mote y Georg Kaser

El deshielo de un glaciar es uno de los símbolos del cambio climático global. Aunque el aumento de las temperaturas puede afectar a la vegetación, los cambios correspondientes en el paisaje no suelen resaltar a la vista. Por el contrario, un glaciar imponente reducido a una fracción de su extensión representa una prueba inequívoca de que el clima modela el aspecto del planeta. A los espectadores del documental *Una verdad incómoda* se les ilustra con pares de fotos del antes y el después de glaciares que están desapareciendo. Por si eso no fuera suficiente, las huellas que el retroceso de estos erosionadores de montañas gigantes deja atrás dan testimonio de su impotencia ante algo tan insustancial como el aire cálido.

Sin embargo, la opinión más extendida —y en general, correcta— de que los glaciares desaparecen a causa de los efectos del calentamiento pasa por alto los procesos físicos responsables de su desaparición. De hecho, el calentamiento no explica el comportamiento de los glaciares y del casquete de hielo del macizo africano del Kilimanjaro, sólo 3 grados al sur del ecuador, ni de otros glaciares tropicales de menor extensión.

El menguante casquete de hielo de la “montaña reluciente”, que tanto destacaba en la película basada en la novela de Hemingway *Las nieves del Kilimanjaro*, no es la imagen adecuada para ilustrar el cambio climático global. El extenso trabajo de campo en glaciares tropicales realizado a lo largo de más de 20 años por uno de los autores (Kaser) revela una historia más complicada e interesante. El Kilimanjaro, un conjunto de tres conos volcánicos que se alzan hasta la fría alta troposfera, ha ganado y perdido hielo mediante procesos que tienen vínculos sólo indirectos, si los tienen, con las recientes pautas del clima global.

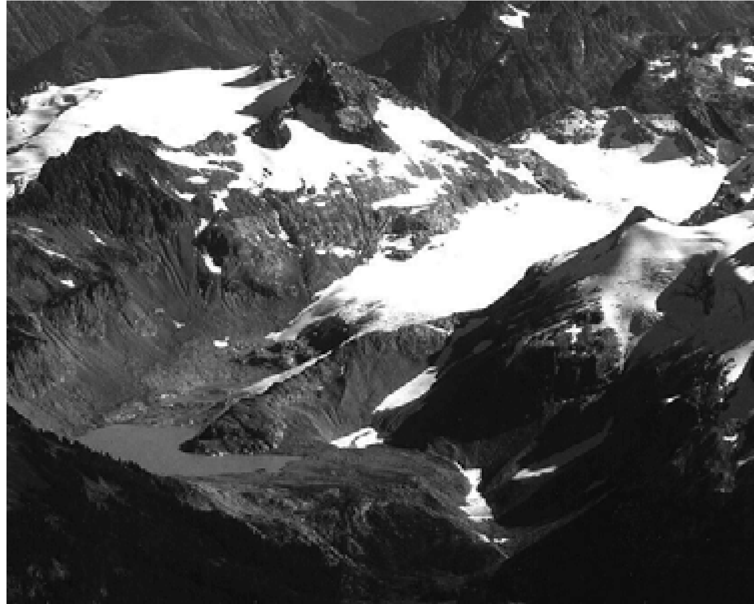
Cambio glacial

El hecho de que existan glaciares en toda la zona tropical merece alguna explicación. La temperatura de la atmósfera desciende unos 0,65 grados Celsius cada cien metros de altitud, por lo que la temperatura del aire en la cima de una montaña de 5000 metros puede ser 32,5 grados menor que la del aire a nivel del mar. Así pues, incluso en los trópicos, las temperaturas en alta montaña se encuentran bajo el punto de congelación. El escalador que asciende una montaña como ésta pasa de una exuberante vegetación tropical a comunidades arbustivas, de éstas a los pastos y, por fin, a una ausencia casi absoluta de vegetación por la falta de agua en estado líquido.

Las temperaturas en la cima de las montañas tropicales varían muy poco de una estación a otra, puesto que al mediodía el Sol está alto a lo largo de todo el año. Con estas temperaturas tan bajas, la nieve se acumula en forma de capas de hielo y glaciares sobre el Kilimanjaro, el monte Kenia y el Rwenzori en el este de Africa, sobre el Irian Jaya en Indonesia y especialmente en los Andes, donde se encuentra el 99,7 por ciento del hielo de los glaciares tropicales.



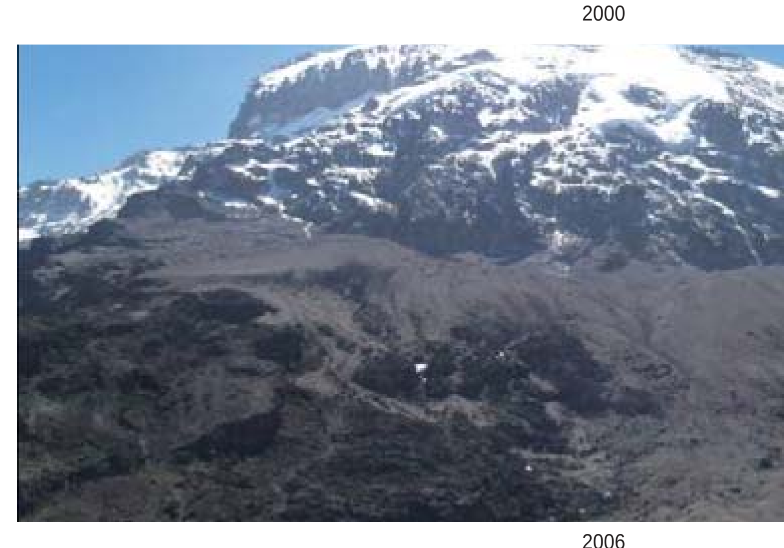
1928



2000



1912



2006



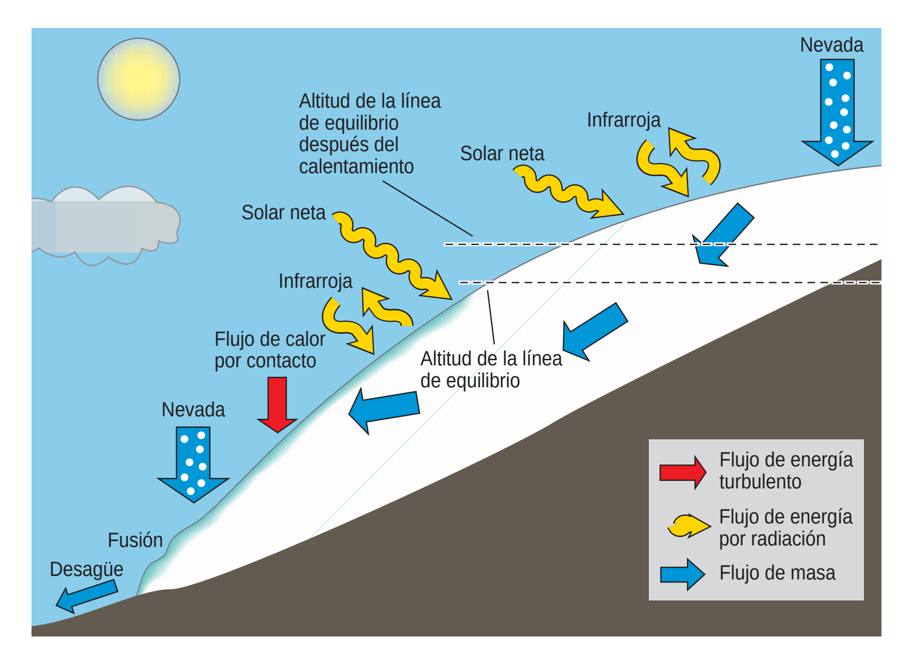
CORTESIA DEL PROGRAMA GLACIAR Y NIEVE DEL SERVICIO GEOLOGICO DE EE.UU. (*arriba*); EDWARD OEHLER (*abajo a la izquierda*) GEORG KASER (*abajo a la derecha*)/*American Scientist*

1. GLACIARES DE TODO EL MUNDO han retrocedido en las últimas décadas. Es posible que el glaciar más estudiado de Norteamérica sea el Cascade Sur, en el estado de Washington, donde las fotografías tomadas por científicos del gobierno en 1928 y en 2000 proporcionan una prueba visible de la pérdida de la mitad de la masa del glaciar (*arriba*). Bases sólidas implican al calentamiento global en ese retroceso y en el de otros glaciares de zonas templadas. Sin embargo, existen escasos indicios de un vínculo directo entre las pautas climáticas globales actuales y la fusión del casquete de hielo del Kilimanjaro, en el este del Africa tropical (*abajo*). Aunque las llanuras a sus pies sean cálidas y secas, las temperaturas en lo alto del macizo se mantienen debajo del punto de congelación. La observación indica que las caras del hielo se reducen a causa de la radiación solar, más que por efecto del calor del aire. En la actualidad, un río de agua de fusión fluye de la lengua del glaciar de Cascade Sur, mientras que apenas si se han observado desagües en el Kilimanjaro. Los campos blancos dispersos de la foto de abajo a la derecha proceden de una nevada reciente. Sólo los campos más blancos y cerrados son glaciares.

Un modo sencillo y físicamente preciso de entender los procesos que crean y controlan estos y otros glaciares es pensar en términos de los balances de energía y de masa.

El balance de masas es la mera diferencia entre acumulación (masa añadida) y ablación (masa restada). En este caso, la masa es el agua en todas sus formas, sólida, líquida y vapor. La masa de un glaciar guarda una estrecha relación con su volumen, que puede calcularse multiplicando su área por la profundidad media. Sabemos si cambia el volumen de un glaciar a través de una prueba obvia y documentada: la modificación de su longitud. El glaciar en retroceso Muir, de Alaska, un caso extremo, perdió más de dos kilómetros de longitud en el último medio siglo.

Los glaciares casi nunca alcanzan el “equilibrio”, antes bien se tambalean como un funambulista sobre la cuerda. Algunas veces, un cambio en el clima altera sustancialmente el



2. LA MAYORIA DE LOS GLACIARES aumentan su masa a partir de las precipitaciones de nieve y la pierden con el desagüe del agua de fusión. Varios factores pueden afectar al balance de masas de un glaciar, en cuyo proceso la localización del glaciar desempeña una función protagonista. Un glaciar de latitudes medias típico (*en verano en este gráfico*) adquiere más masa en sus partes más altas y la pierde en su lengua. La altitud de la línea de equilibrio es el punto donde ambas tendencias se equilibran. Sobre esa línea, el glaciar gana energía de la radiación solar y la pierde por radiación infrarroja hacia la atmósfera. Bajo la línea, la transferencia de calor por contacto del aire, más cálido, hacia el glaciar aporta energía a éste. Con el calentamiento ambiental, la línea de equilibrio sube; se incrementan las aportaciones del flujo de calor por contacto y de la radiación infrarroja, con el consiguiente incremento de la fusión. Las gotas de agua llevadas por el viento y congeladas por contacto, la escarcha, contribuyen poco al aumento de la masa.

TOM DUNNE/*American Scientist*

equilibrio del glaciar; su masa puede tardar decenios en alcanzar un nuevo equilibrio.

La masa añadida proviene en su mayor parte de la atmósfera, generalmente en forma de nieve, aunque también en forma de lluvia, que se congela. En raras ocasiones se incorpora convertida en escarcha: gotas transportadas por el viento tan frías, que se congelan por contacto.

El proceso más evidente de pérdida de masa nos lo ofrece el desagüe de agua fundida procedente de la superficie del glaciar. Se reduce también la masa glacial con la sublimación, proceso en el que el hielo se convierte directamente en vapor de agua. Puede darse a temperaturas muy por debajo del punto de fusión, aunque requiere ocho veces más energía que la fusión. A la sublimación, que ocurre cuando la humedad del aire es menor que la humedad procedente de la superficie del hielo, se debe que los alimentos que no se guardan en la nevera en un recipiente bien sellado pierdan su humedad y se "quemen".

Aire, hielo y equilibrio

La fusión, la sublimación y el calentamiento del hielo requieren energía. En la alta montaña, la energía proviene de varios flujos de energía que interaccionan de una manera compleja. El Sol, fuente de energía primaria, ejerce sus efectos directos durante el día. Aparte de la noche, otros factores que limitan la acción solar son la sombra y el grado en que la nieve refleja la luz visible. Sin embargo, la energía puede llegar al glaciar a través de *flujos de calor por contacto* —intercambio de calor entre una superficie y el aire en contacto con ella, en este caso calor extraído directamente del aire en contacto con el hielo— y de emisiones infrarrojas procedentes de la atmósfera y la superficie terrestre. Por otro lado, la energía puede abandonar el hielo del glaciar de varias maneras: flujo de calor por el contacto del glaciar con aire frío, emisiones infrarrojas de la superficie de la nieve y el hielo, y "el calor latente" que necesita el agua para realizar el cambio de estado sólido a líquido (fusión) y de sólido a gas (sublimación).

Los glaciares de montaña acumulan nieve a gran altitud, se deslizan por las laderas —algunos a velocidades de dos metros por día— y en verano se funden a baja altitud. Algunos glaciares de latitud media alcanzan el mar gracias, en parte, a copiosas precipitaciones de nieve, de más de tres mil litros de equivalente líquido por metro cuadrado al año.

En algún lugar entre el extremo superior y el inferior de un glaciar de montaña hay una altura por encima de la cual la acumulación supera la ablación y bajo la cual la ablación es mayor que la acumulación: la "altitud de la línea de equilibrio" (ALE). El aumento de la temperatura del aire incrementa el flujo de calor por contacto desde el aire hasta la superficie del glaciar y la radiación infrarroja absorbida por el glaciar, por lo que la fusión es más rápida y se da sobre una porción mayor del glaciar.

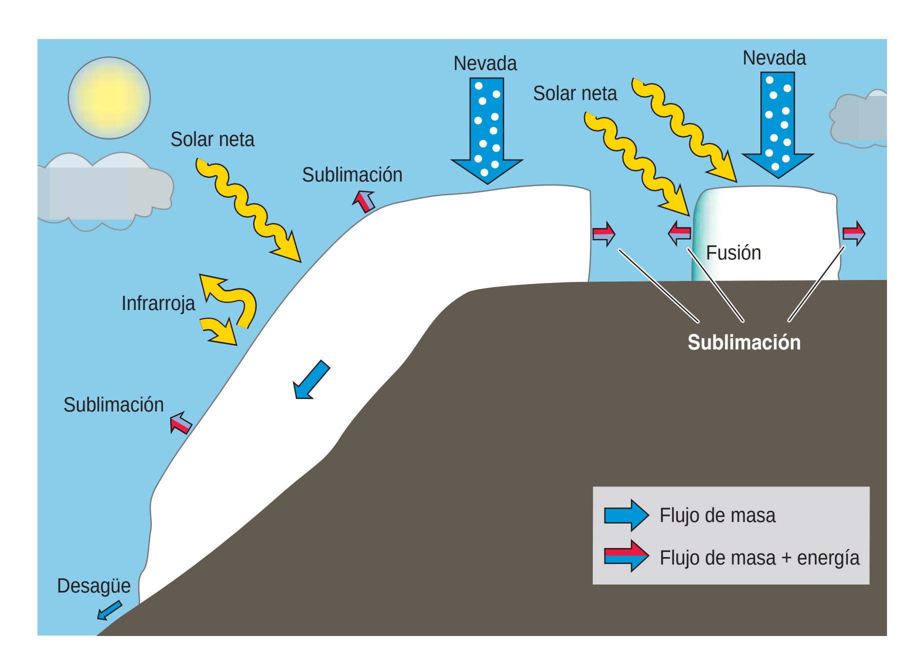
Por tanto, la elevación de la temperatura también eleva la altitud de la línea de equilibrio. En latitudes con estaciones muy diferenciadas aumenta así la parte del glaciar que se funde cada verano y, en algunos casos, puede disminuir la parte del glaciar capaz de retener la masa acumulada durante el invierno. Apenas si hay glaciares en el mundo que no hayan retrocedido en cuantía importante durante el transcurso de los últimos 150 años, y algunos de los más pequeños han desaparecido del todo. El calentamiento parece ser la principal causa de estos cambios, hasta el punto de que se han utilizado los registros de la extensión de los glaciares para estimar las temperaturas del pasado, con resultados que concuerdan con los datos obtenidos de los anillos de los árboles y otras mediciones indirectas.

Sin embargo, las condiciones de los glaciares son muy distintas en los trópicos, donde la diferencia de temperatura es mucho mayor entre el día y la noche que entre el mes más cálido y el más frío. La característica

estacional más marcada en los trópicos estriba en la existencia de una o dos estaciones de lluvias, cuando la acumulación glacial es mayor y, a causa de la nubosidad, menor la radiación solar.

Dado que en los glaciares tropicales apenas si existe fluctuación estacional de la ELA, una porción mucho menor del glaciar se encuentra a altitudes más bajas que esa cota. Es decir, como los procesos que merman los glaciares operan casi a diario, extienden su eficacia sobre una superficie mucho menor. Esa superficie menor implica, también, que los márgenes superior e inferior de los glaciares tropicales ofrecerán una respuesta más rápida a los cambios que sufra el balance de masas.

Otra importante distinción en los glaciares tropicales es la diferencia entre regímenes secos y húmedos. En los regímenes húmedos, los cambios de la temperatura del aire tienen importancia para el cálculo del balance de masas; en los regímenes secos del este de Africa, importan más los cambios de la humedad atmosférica. Los vínculos entre estos cambios y los incrementos globales de gases de efecto invernadero resultan más débiles en los regímenes tropicales. La variabilidad anual y las tendencias a largo plazo de la distribución estacional de la humedad responden a la influencia de la temperatura de la superficie de los océanos tropicales, los cuales, a su vez, responden al clima global. En muchos de los glaciares tropicales, lo mismo el efecto directo del calentamiento global que el indirecto —las variaciones de la humedad atmosférica— son responsables de la pérdida de masa observada. El solo hecho de que el hielo esté desapareciendo no aporta luz sobre el mecanismo responsable. De la mayoría de los glaciares no existen registros observacionales ni mediciones detalladas. A esa carencia hay que añadir la dificultad para distinguir entre uno y otro agente causal.



3. LA UBICACION DEL KILIMANJARO en una zona climática tropical fría y árida varía su ecuación de balance de masas. En los trópicos, los glaciares no van y vienen de veranos a inviernos, de nevadas a fusiones; las temperaturas cambian más de la mañana a la noche que de unas estaciones a otras. El casquete de hielo del Kilimanjaro se encuentra en su llana cumbre, a 5700 metros de altitud; presenta bordes verticales y diversos glaciares de vertiente, la mayoría de ellos a altitudes en las que las temperaturas se mantienen por debajo del punto de congelación y en las que la principal fuente de energía es la radiación solar. La superficie glaciar emite hacia el aire circundante una cantidad considerable de radiación infrarroja. Los glaciares del Kilimanjaro pierden masa por sublimación, la transformación directa del hielo en vapor de agua. Apenas si se observa agua procedente de la fusión del hielo.

TOM DUNNE/*American Scientist*

La montaña resplandeciente

¿Qué ocurre en el Kilimanjaro? Aunque la relación entre el clima y los glaciares tropicales varía según los lugares, el régimen glacial del Kilimanjaro es único. Su hielo se encuentra en un casquete de hielo de hasta cuarenta metros de espesor, situado en una meseta bastante llana de su pico volcánico más alto, el Kibo, entre 5700 y 5800 metros sobre el nivel del mar, y en varios glaciares de vertiente situados más abajo. Los glaciares de vertiente se extienden y bajan hasta unos 5200 metros (uno de ellos, en una ladera umbría, llega hasta los 4800 metros).

El casquete de hielo es demasiado delgado para que se deforme y la meseta demasiado llana para que deslice por ella. Los flancos de la cumbre, muy abruptos, presentan una pendiente media de 35 grados. Sin embargo, los glaciares de vertiente, que se mueven poco en comparación con los de las latitudes medias y templadas, adquieren y pierden masa a lo largo de sus inclinadas superficies. El hielo de la meseta tiene dos tipos de cara que interactúan, cada uno de manera bastante distinta, con la atmósfera y, por lo tanto, con el clima: superficies casi horizontales y escarpes casi verticales (los bordes laterales del hielo de la meseta).

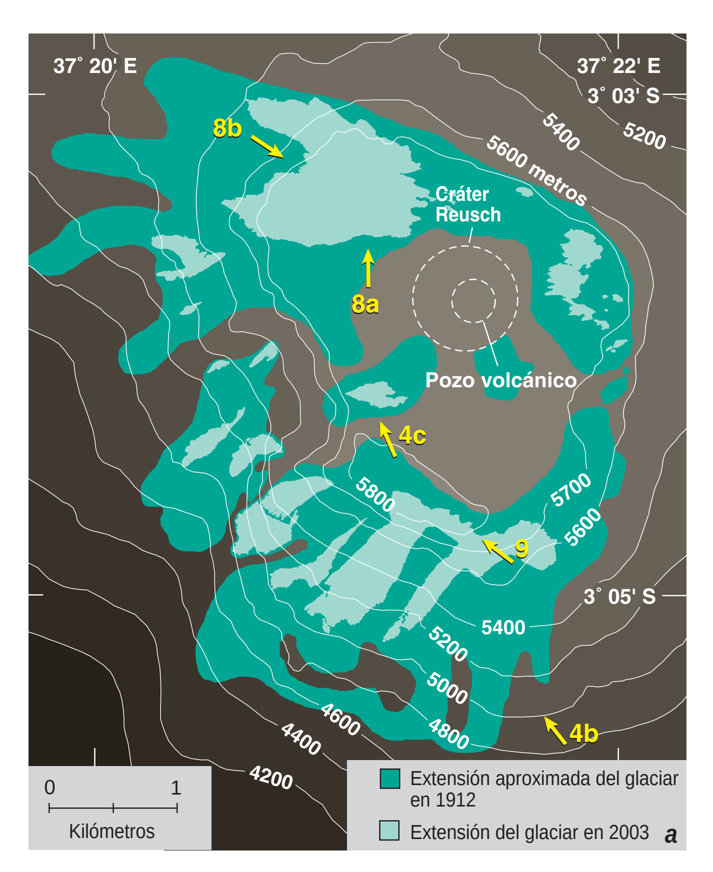
¿Qué factores explicarían el declive del hielo del Kilimanjaro? El calentamiento global es un sospechoso evidente: ha participado claramente en el declive glacial de otros lugares, según estudios detallados del balance de masas (de los pocos glaciares en los que se han hecho esos estudios) y conforme a las correlaciones entre la extensión de los glaciares y la temperatura del aire (en muchos más glaciares). El ascenso de las temperaturas del aire modifica el balance energético de la superficie mediante la potenciación de la transferencia de calor por contacto entre la atmósfera y el hielo, el incremento de la radiación infrarroja y, finalmente, la elevación de la ELA, con la consiguiente ampliación de la superficie en que se produce la pérdida de masa. (El primer y único artículo que ha asociado el retroceso del glaciar del Kibo al aumento de la temperatura del aire fue el publicado en el año 2000 por Lonnie G. Thompson y otros, de la Universidad estatal de Ohio.)

Otra causa posible es el descenso en la acumulación combinado con el aumento de la sublimación, fenómenos ambos dirigidos, posiblemente, por la variación en la frecuencia y cantidad de la nubosidad y las precipitaciones de nieve. Lo barruntaron ya los exploradores europeos del siglo XIX. Mejoraron sustancialmente el argumento los trabajos de campo de Kaser, Douglas K. Hardy, del Centro de Investigación del Clima de la Universidad de Massachusetts en Amherst, Tharsis Hyera y Juliana Adosi, de la Agencia Meteorológica de Tanzania, y otros.

Hardy invitó en 2001 a Kaser y a unos periodistas de televisión a colaborar con él en el rodaje de un documental sobre el retroceso del hielo del Kibo. Los instrumentos que Hardy había dejado en la meseta del Kibo llevaban alrededor de año y medio tomando datos meteorológicos. Kaser estudiaba los glaciares tropicales desde hacía más de quince. El equipo instaló sus tiendas justo debajo de uno de los más impresionantes escarpes del campo de hielo Norte, en su borde meridional. Durante cinco días con sus noches observamos allí el hielo y debatimos sobre los mecanismos que controlaban los cambios, estimulados una y otra vez por las incisivas preguntas de los dos periodistas. Las cenizas volcánicas del Kibo nos proporcionaron la pizarra sobre la que dibujamos y un bastón de esquí nos sirvió de lápiz a medida que el régimen de los glaciares del Kibo nos iba quedando más claro. Así fue como se planteó la hipótesis básica que todavía hoy domina nuestra investigación y que las subsecuentes mediciones de campo sobre los balances de masas y energético han confirmado con claridad: que la temperatura local del aire y sus cambios ejercían un efecto menor. Aquí está la prueba.

Tiempo y temperatura

Las observaciones existentes del hielo del Kilimanjaro desde 1880 hasta 2003 nos permiten cuantificar las variaciones de la superficie, pero no las de la masa y el volumen. Hans Meyer y Ludwig Purtscheller alcanzaron la cima, los primeros, en 1889. Basándose en sus informes y anotaciones, pero sobre todo en las morrenas identificadas mediante series de fotografías, Henry Osmaston calculó en 1989 que la superficie medía 20 kilómetros cuadrados en 1880. En 1912, un preciso mapa a escala 1:50.000, basado en fotogrametría terrestre (la determinación de distancias y tamaños a partir de mediciones en fotografías tomadas en tierra), obra de Edward Oehler y Fritz Klute, estableció la superficie en 12,1

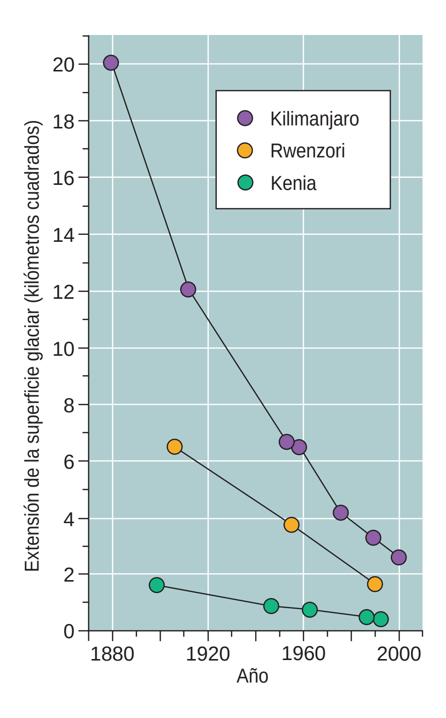






4. EL HIELO DEL KILIMANJARO se circunscribe a su pico volcánico más alto, el Kibo. Sus glaciares se exploraron a finales del siglo XIX y se estudiaron ya en 1912, casi un cuarto de siglo antes de que Ernest Hemingway les proporcionara fama literaria al titular una de sus novelas *Las nieves del Kilimanjaro*. En 1912 los glaciares ocupaban una superficie total de 12,1 kilómetros cuadrados; para 2003 la superficie se había reducido a 2,5 kilómetros cuadrados (*a*). El retroceso más rápido pudo tener lugar entre 1912 y 1953, año en que la superficie era de 7 kilómetros cuadrados. Las flechas señalan la posición de los puntos de vista de las dos fotografías de la derecha —una vista aérea del Kibo desde el suroeste (*4b*) y una vista del hielo de la meseta desde el sur-sureste (*4c*) con el Campo de Hielo Norte al fondo— y de las expuestas en las figuras 8 y 9.

MAPA ADAPTADO DE CULLEN ET AL., *Geophysical Review Letters* 33, 2006; FOTOGRAFIAS CORTESIA DE GEORG KASER/*American Scientist*





5. LAS MEDICIONES DE SU EXTENSION indican que todos los grandes glaciares del este del Africa tropical (el ecuador es la *línea discontinua*) están retrocediendo. El ritmo de este retroceso no se ajusta a la velocidad de cambio de temperaturas global. Muchos glaciares que en actualidad están en rápido retroceso alcanzaron el equilibrio, e incluso crecieron, en la los setenta. El casquete de hielo del Kilimanjaro, por el contrario, parece haber retrocedido con especial rapidez durante la primera mitad del siglo XX.

GRAFICO ADAPTADO DE KASER ET AL., *Journal of Climatology* 24, 2004 (*arriba*); DATOS DE LOS CENTROS NACIONALES DE LA PREDICCION MEDIOAMBIENTAL/CENTRO NACIONAL DE LA INVESTIGACION ATMOSFERICA RECOPILADOS POR DOUG HARDY, UNIVERSIDAD DE MASSACHUSETTS EN AMHERST (*abajo*)/*American Scientist*

kilómetros cuadrados. Hacia 2003, la superficie era de sólo 2,5 kilómetros cuadrados, una reducción de casi el 90 por ciento. Sin embargo, el grueso de la reducción se había producido ya para 1953, cuando la extensión era de 6,7 kilómetros cuadrados (un retroceso de un 66 por ciento desde 1880). Durante ese mismo período, el movimiento del hielo ha sido casi nulo en la meseta y muy pequeño en las laderas. Existen indicios de que los glaciares de vertiente, al menos, están a punto de conseguir el equilibrio.

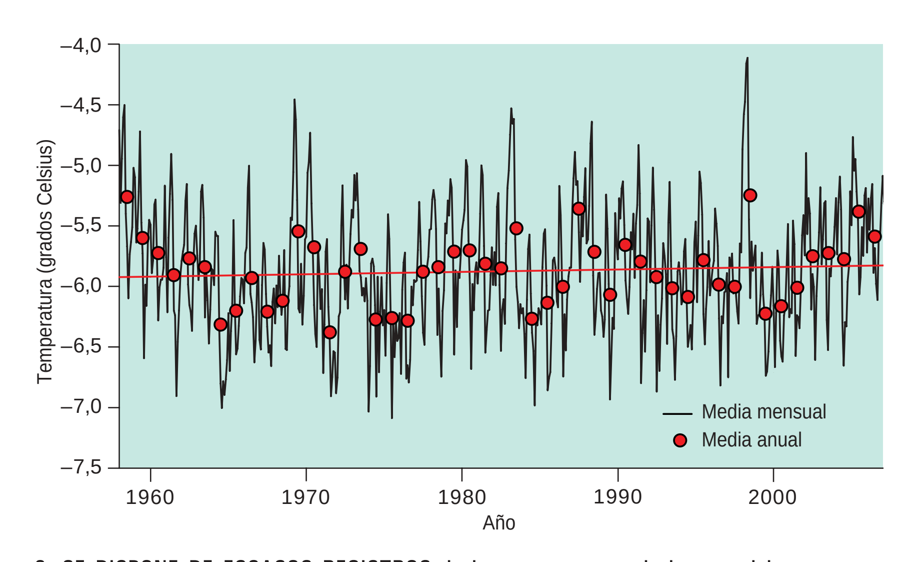
Esta pauta de cambio no coincide con el ritmo a que han ido variando las temperaturas mundiales: tras un período de estabilidad, vienen experimentado un fuerte incremento desde la década de los setenta. Otros glaciares sí han seguido el paso de las temperaturas; muchos alcanzaron el equilibrio, o incluso avanzaron, hacia los años setenta, antes de empezar un gran retroceso.

Cuesta establecer la tendencia de las temperaturas a causa de la escasez de mediciones. En cualquier caso, tomados en su conjunto, los datos presentados en el informe de 2007 del IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático) apenas si descubren alguna en la temperatura local a lo largo de las últimas décadas. En los altiplanos del Africa oriental, a mucha menor altura que las cimas del Kilimanjaro, los registros de temperatura sugieren un calentamiento de 0,5-0,8 grados entre 1901 y 2005, una cifra nada trivial aunque probablemente superior a la del calentamiento en el Kibo.

En la troposfera libre, extensa capa donde se encuentra el Kibo, el ritmo de calentamiento durante el período 1979-2004 para la zona comprendida entre los 20 grados de latitud N y S fue menor de 0,1 grados por década, menor que el de la superficie a nivel del mar en el mismo período y estadísticamente no diferente de cero. Las medias sobre toda esa gruesa capa de la atmósfera, sin embargo, pueden ser una pobre estimación del calentamiento en el Kilimanjaro, si bien se ha sostenido que el calentamiento quizá haya sido casi el mismo en todas las longitudes tropicales, dado que los efectos rotacionales son pequeños, lo que impone estrictas limitaciones dinámicas.

A partir de las medidas de la temperatura del aire en la superficie de 500 milibares de presión atmosférica (aproximadamente a 5500 metros de altitud), obtenidas de globos sonda, un artículo deduce una tendencia al calentamiento en la troposfera media tropical desde alrededor de 1960 hasta 1979, seguido de un enfriamiento de 1979 a 1997. Pero el estudio en cuestión no se ha actualizado.

Dos de los grupos de datos utilizados para calcular dichas medias tropicales son “reanálisis” de información previa: las observaciones se incluyen



6. SE DISPONE DE ESCASOS REGISTROS de las temperaturas de la zona del Kilimanjaro. Lo que no empece que contemos ahora con un registro de las lecturas de globos meteorológicos a la altura de su cima, ampliadas por un “reanálisis”, el uso de un modelo dinámico global que genera información coherente de la temperatura allá donde no existen observaciones. Los datos resultantes muestran que las temperaturas medias mensuales alrededor de la cima del Kilimanjaro han fluctuado entre –4 y –7 grados Celsius desde 1958; cuando se traza una línea a través de esos puntos no se observa una tendencia al calentamiento significativa.

en un modelo dinámico global que proporciona información dinámicamente coherente sobre las temperaturas, los vientos y demás fenómenos meteorológicos, incluso donde no se han efectuado observaciones. En el punto de reanálisis más cercano a la cima del Kilimanjaro parece no haber una tendencia desde finales de los años cincuenta. De todos modos, al igual que la información procedente de los globos sonda y los satélites, los datos del reanálisis pueden no ser los apropiados para establecer tendencias a lo largo del tiempo.

La combinación de estas líneas de investigación dispares no dan a entender que haya habido calentamiento en la cumbre del Kilimanjaro suficiente para explicar la desaparición de la mayor parte de su hielo, ni a lo largo de todo el siglo XX ni durante el período mejor medido, los últimos 25 años.

En el congelador

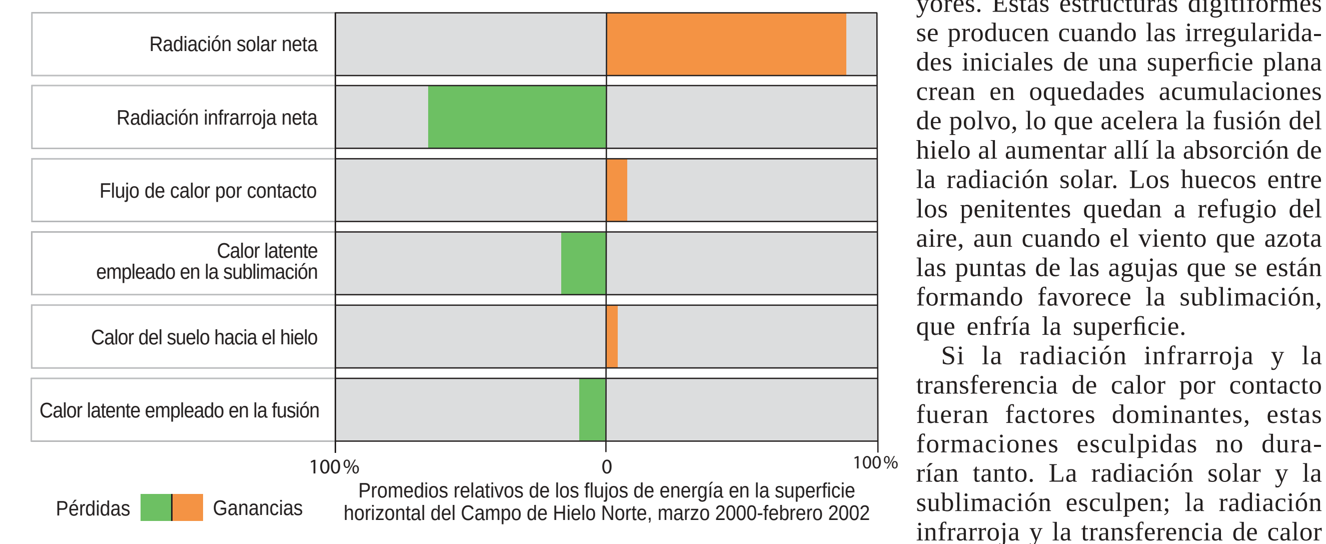
Se ha observado también que las temperaturas del aire a la altura de los glaciares y el casquete de hielo del Kilimanjaro son casi siempre bastante inferiores al punto de congelación (rara vez superan los –3 grados). Así pues, el aire no puede, por sí mismo, calentar el hielo y fundirlo, ni por flujo de calor por contacto, ni por radiación infrarroja: en las ocasiones en que hay fusión, la produce la radiación solar, con muy poco viento, circunstancia que permite la generación de una capa cálida de aire muy cerca del hielo.

Otros indicios que guardan relación con éste son los relativos a la forma y la evolución del hielo. Espectaculares muros de hielo de alturas asombrosas (de más de 40 metros en algunos lugares) se levantan ante el visitante de la cima del Kibo. Esos bordes no pueden crecer horizontalmente, pero sí pierden sin cesar masa por ablación (primero por sublimación e intermitentemente por fusión) cuando quedan expuestos al Sol, aunque la temperatura del aire se halle por debajo del punto de congelación. Una vez se han desarrollado, los bordes casi verticales retrocederán hasta que desaparezca el hielo, ya que la nieve no puede acumularse en esas paredes.

El observador atento se percata de otro hecho sorprendente: las paredes tienen una orientación predominante este-oeste. Esta característica guarda relación con la radiación solar, cuya intensidad viene regulada por las pautas diarias y estacionales de la nubosidad: el ciclo diario de convección atmosférica profunda que tiene lugar sobre el Africa central supone que las tardes, cuando el Sol se encuentra al oeste, sean muy nubosas. En las estaciones equinocciales, cuando el Sol está casi en la normal, las tardes son también nubosas, mientras que cuando el Sol se halla al norte o al sur (durante los solsticios), la cumbre aparece libre de nubes. Por la misma razón, los bordes del hielo retroceden más lentamente por las caras oeste, noroeste y suroeste.

El papel de la radiación solar en el modelado de los bordes del hielo es evidente en otros aspectos. Mientras el hielo retrocede horizontalmente, puede dejar tras de sí vestigios verticales de poco grosor, como cuchillas; llegan a ser tan delgados, que se desmoronan y desaparecen. Al igual que otros exploradores que llegaron antes que ellos, Kaser y Hardy vieron en el casquete de hielo del Kibo, en más de una ocasión, unas formaciones esculpidas llamadas *penitentes* También se han observado penitentes en muchos lugares de los Andes y el Himalaya, donde algunas veces son mucho mayores. Estas estructuras digitiformes se producen cuando las irregularidades iniciales de una superficie plana crean en oquedades acumulaciones de polvo, lo que acelera la fusión del hielo al aumentar allí la absorción de la radiación solar. Los huecos entre los penitentes quedan a refugio del aire, aun cuando el viento que azota las puntas de las agujas que se están formando favorece la sublimación, que enfría la superficie.

Si la radiación infrarroja y la transferencia de calor por contacto fueran factores dominantes, estas formaciones esculpidas no durarían tanto. La radiación solar y la sublimación esculpen; la radiación infrarroja y la transferencia de calor por contacto son difusas, actúan en todas las direcciones y, por lo tanto, allanan las formas. La persistencia de estas abruptas formaciones en la cima del Kilimanjaro constituye una prueba fehaciente de que no actúan los factores que allanan las formas, estrechamente relacionados, desde un punto de vista energético, con la temperatura del aire.



7. SE HA PROCEDIDO AL REGISTRO INSTRUMENTAL de los flujos de energía de y hacia la superficie del glaciar de la cumbre del Kibo. Los flujos de energía por radiación constituyen la base del intercambio de calor. El flujo neto infrarrojo es claramente negativo porque la radiación infrarroja está controlada por la temperatura, y la temperatura de emisión de la atmósfera es mucho menor que la de la superficie del glaciar. El tercer gran flujo de energía es el calor latente que abandona la superficie en la sublimación. La energía necesaria para la fusión es menos de la mitad y, además, el agua de fusión se vuelve a congelar en las capas inferiores del hielo. Otros flujos apenas si contribuyen al proceso.

ADAPTADO DE MÖLG Y HARDY, *Journal of Geophysical Research* 109, 2004/*American Scientist*





8. LOS VISITANTES DE LA CUMBRE DEL KILIMANJARO son recibidos por escarpes de hielo de hasta 40 metros de altura en algunos lugares (*a*) (Para hacerse una idea de la escala, véase el científico que controla instrumentos al pie de una pared de 30 metros de altura). La cara meridional del Campo de Hielo Norte, como se aprecia aquí, retrocede cuando el Sol se encuentra al sur; la cara septentrional retrocede cuando el Sol está al norte. La convección profunda diaria sobre el Africa central hace que la mayoría de las tardes, cuando el Sol está al oeste, sean nubosas y que los márgenes oeste, noroeste y suroeste retrocedan más lentamente. Esta pauta refuerza la idea de que la responsable de la merma es la radiación solar. El retroceso deja formaciones de hielo sueltas (*b*) que acaba por menguar tanto, que se desmoronan.

Balance de masas

¿Qué se sabe del balance de masas del hielo del Kibo? La investigación reciente sobre los flujos de masa y de energía ha puesto de manifiesto que el balance de masas en las superficies horizontales del Kibo viene regido por la presencia o ausencia de precipitaciones de nieve abundantes y frecuentes. Hardy ha venido midiendo directamente la estratificación anual de nieve en el Kilimanjaro desde el año 2000 con hitos. De acuerdo con los datos recabados, la superficie horizontal del Campo de Hielo Norte ha experimentado dos años de balance de masas casi nulo. La mayor ganancia neta de masa correspondió al año 2006, que terminó en Africa oriental con lluvias excepcionales, fuertes y prolongadas, asociadas a anomalías de la temperatura de la superficie del océano Indico. Durante meses, la nieve cubrió casi por entero la cumbre del Kilimanjaro.

La precipitación de nieve es el principal proceso que incrementa la masa de hielo, pero las nevadas intervienen también en el balance energético, función cuya importancia aumenta aún más por el papel prominente de la radiación solar. Con la pérdida de masa tienen que ver la cantidad y, sobre todo, la frecuencia de las precipitaciones de nieve: la superficie de la nieve antigua o ensuciada es oscura y absorbe bastante más energía de la radiación solar que la superficie blanca de la nieve reciente.

Cuando hay más energía disponible en la superficie de un glaciar, aumenta la sublimación. Mas, incluso con temperaturas inferiores al punto de congelación, la misma energía puede incrementar la fusión si no sopla el viento. Es de suponer que el agua de fusión de la superficie volverá a congelarse en capas de hielo inferiores, por lo que la fusión no constituye, necesariamente, una pérdida para la capa de hielo en su conjunto: un observador de un glaciar de vertiente difícilmente verá saliendo del pie del glaciar algo más que un hilo de agua de fusión.

La comparación de fotografías históricas indica que a lo largo del siglo pasado el adelgazamiento del glaciar de la meseta ha sido de unos 10 metros, ritmo de pérdida de masa que puede explicarse por unas precipitaciones de nieve que no compensan la sublimación. Sin embargo, la reducción observada de la extensión de la superficie de hielo se da principalmente por los bordes verticales, detalle que la pauta de las nevadas no explica.

El balance de masas de los glaciares de vertiente difiere algo del que se observa en el hielo de la meseta. Los glaciares en retroceso de las latitudes medias pierden la mayor parte de su masa por debajo de la ELA y poca o ninguna por encima. Los glaciares de vertiente del Kibo, en cambio, retroceden por el límite superior y por el inferior. Su historia nos dice que en 1900 se encontraban muy lejos del equilibrio, si bien parece que su reducción se está frenando. Esto, junto a su forma convexa, sugiere que están cerca de alcanzar un nuevo equilibrio, con un tamaño menor, entre las pérdidas hasta cierto punto constantes y la acumulación disminuida.

Los glaciares y el cambio climático

Las observaciones descritas hasta aquí apuntan a una combinación de factores distintos del calentamiento del aire —principalmente, una mayor sequedad del aire del macizo, que redujo la acumulación y aumentó la ablación— como causa de la desaparición del hielo del Kilimanjaro desde los días de las primeras observaciones, efectuadas en el penúltimo decenio del siglo XIX. El balance de masas está dominado por la sublimación, que requiere mucha más energía por unidad de masa que la fusión; esa energía la proporciona la radiación solar.

Estos procesos son casi insensibles a la temperatura y, por ello, al calentamiento global. Si la temperatura del aire acabara por superar



9. LAS FORMACIONES DIGITIFORMES llamadas "penitentes" se integran en el casquete de hielo del Kibo. Son una prueba más de que el calentamiento no actúa allí. La radiación solar y la sublimación suelen crear este tipo de estructuras; la radiación infrarroja y la transferencia de calor por contacto, en cambio, las suavizan. La silueta que se ve es la de Nicolas Cullen, de la Universidad de Otago de Nueva Zelanda.

GEORG KASER/*American Scientist*

el punto de congelación, el flujo de calor por contacto y las emisiones atmosféricas de onda larga tomarían el relevo de la sublimación y la radiación solar. Como los glaciares de la cima no están sombreadas, pronto desaparecerían todas las formaciones afiladas. Sin embargo, estas formas han permanecido más de un siglo. Del mismo modo, cuando los exploradores del siglo XIX llegaron a la cima del Kilimanjaro las paredes verticales de hielo ya se habían desarrollado y se habían puesto en marcha los procesos de pérdida de masa que han continuado hasta la actualidad.

Una pista más sobre el ritmo de la merma de hielo proviene del nivel del agua del vecino lago Victoria. Los registros históricos y otros datos representativos del nivel del lago indican un descenso sustancial de las precipitaciones regionales a finales del siglo XIX, tras decenios de intensa pluviosidad. En general, lo que sugieren los registros históricos disponibles es que el enorme casquete de hielo descrito por los exploradores de la época victoriana debíase a un período inusualmente húmedo, no a unas temperaturas globales más frías.

Si el calentamiento global inducido por la Humanidad ha desempeñado alguna función en el retroceso del hielo del Kilimanjaro, habrá sido bastante tarde, cuando el resultado estaba ya definido; como mucho, habrá desempeñado un papel accesorio, con una influencia indirecta. Las investigaciones del calentamiento y sus causas que establecen que la influencia humana en el clima mundial empezó a manifestarse con nitidez algo después de 1950, llegan a esa misma conclusión acerca de la temperatura del este de Africa a altitudes mucho menores que la cima del volcán.

El hecho de que la pérdida de hielo en el monte Kilimanjaro no valga como prueba del calentamiento global no significa que la Tierra no se esté calentando. Existen numerosos indicios, muy sólidos, de que la temperatura media de la Tierra ha aumentado en los últimos 100 años; el retroceso de los glaciares de latitudes altas y medias constituye una parte importante de la prueba. Sin embargo, las condiciones especiales que se dan en el Kilimanjaro lo distinguen de las montañas de latitudes mayores, cuyos glaciares retroceden a causa de la subida de la temperatura del aire. Los balances de masas y energético, así como las formas que adopta el hielo, apuntan en la misma dirección: a un papel insignificante de la temperatura atmosférica en las fluctuaciones del hielo del Kilimanjaro.

Es posible, sin embargo, que exista una conexión indirecta entre la acumulación de gases de efecto invernadero y la desaparición del hielo del Kilimanjaro. Hay indicios muy sólidos de una asociación a lo largo de los últimos 200 años entre las temperaturas de la superficie del océano Indico y la circulación atmosférica y las pautas de precipitación que alimentan o reducen el hielo del Kilimanjaro. Estas pautas han hecho retroceder el hielo desde finales del siglo XIX, o quizá sería más preciso decir que han revertido el exceso en el crecimiento del hielo del tercer cuarto del siglo XIX. Cualquier participación de los cada vez más abundantes gases de efecto invernadero en este modelo de circulación habrá tenido lugar, necesariamente, sólo en las últimas décadas; por lo tanto, será responsable, como mucho, de una parte del retroceso reciente del hielo y de una parte mucho menor del retroceso total.

¿Está condenado a desaparecer el casquete de hielo del Kilimanjaro? Es posible. Los altos bordes del hielo que aún existe dificultan la expansión horizontal del casquete. Aunque en el curso de meses y años puedan acumularse nevadas sobre el hielo, las que caigan sobre las rocas de la meseta se sublimarán o fundirán en cuestión de días (con la notable excepción del período de varios meses de cobertura continua de nieve que empezó a finales de 2006 y continuó en 2007), en parte porque una fina capa de nieve sobre roca oscura no se mantiene por mucho tiempo, ya que los procesos de pérdida reducen la nieve reflectante y exponen roca que absorbe radiación solar. Si la capa de hielo fuera mucho más gruesa y tuviese una forma que permitiera al hielo deslizarse hacia fuera, se podrían desarrollar suaves pendientes a lo largo de los bordes del casquete; las nuevas aportaciones de nieve estarían protegidas de las pérdidas y se acumularían. Sin embargo, los bordes escarpados no permiten semejante tipo de expansión.

Por otro lado, si la atmósfera alrededor del Kilimanjaro se calentara ocasionalmente por encima de los 0 grados, la transferencia de calor a la superficie del hielo, por contacto y por radiación infrarroja, erosionaría las aristas del casquete de hielo y se desarrollarían presto pendientes más suaves. Si, además, se incrementara la precipitación, la nieve podría acumularse en las vertientes y permitiría crecer al casquete.

Paradójicamente, un calentamiento global considerable, acompañado de un incremento en la precipitación, podría salvar el hielo del Kilimanjaro. Podría salvarse también con un gran incremento de la precipitación de nieve, como el experimentado en las nevadas de 2006-2007, que cubriera la superficie formada por oscuras cenizas con un grosor tal, que no se sublimara por completo antes de la siguiente estación de lluvias. Una vez iniciado, un cambio así permitiría que la capa de hielo creciese. Esté el casquete de hielo del Kibo desapareciendo, o esté creciendo y convirtiéndose en algo distinto mientras usted lee estas palabras, no se trataría, nos dice la glaciología con bastante seguridad, ni de la primera vez, ni de la última.

Los autores

Philip W. Mote es investigador de la Universidad de Washington, integrado en su grupo de impactos climáticos y docente en el departamento de ciencias atmosféricas. Es coautor de otro artículo de este número, *El fundamento físico del cambio global*. El y **Georg Kaser** se conocieron durante la confección del el IV Informe Evaluador del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Kaser, glaciólogo, enseña en la Universidad de Innsbruck. Estudioso de los glaciares tropicales, ha dirigido también trabajos de campo en el Kilimanjaro (Tanzania), el Rwenzori (Uganda), la cordillera Blanca (Perú) y en los Alpes. Preside la Comisión de Ciencias Criosféricas de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica.

Bibliografía complementaria

GLACIERS, GLACIATION AND EQUILIBRIUM LINE ALTITUDES ON KILIMANJARO. H. OSMASTON en *Quaternary and Environmental Research on East African Mountains*, dirigido por W. C. Mahaney, págs. 7-30. Brookfield; Rotterdam, 1989.

A REVIEW OF MODERN FLUCTUATIONS OF TROPICAL GLACIERS. G. Kaser en *Global and Planetary Change*, vol. 22, n.os 1-4, págs. 93-103; 1999.

MULTIDECADAL CHANGES IN THE VERTICAL TEMPERATURE STRUCTURE OF THE TROPICAL TROPOSPHERE. D. J. Gaffen, B. D. Santer, J. S. Boyle, J. R. Christy, N. E. Graham y R. J. Ross en *Science*, vol. 287, págs. 1242-1245; 2000.

ICE-CORE PALEOCLIMATE RECORDS IN TROPICAL SOUTH AMERICA SINCE THE LAST GLACIAL MAXIMUM. L. G. Thompson, E. Mosley-Thompson y K. A. Henderson en *Journal of Quaternary Science*, vol. 15, págs. 377-394; 2000.

KILIMANJARO ICE CORE RECORDS: EVIDENCE OF HOLOCENE CLIMATE CHANGE IN TROPICAL AFRICA. L. G. Thompson *et al.* en *Science*, vol. 98, págs. 589-593; 2002.

SOLAR-RADIATION-MAINTAINED GLACIER RECESSION ON KILIMANJARO DRAWN FROM COMBINED ICE-RADIATION GEOMETRY MODELING. T. Mölg, D. R. Hardy y G. Kaser en *Journal of Geophysical Research*, vol. 108(D23), págs. 4731; 2003.

MODERN GLACIER RETREAT ON KILIMANJARO AS EVIDENCE OF CLIMATE CHANGE: OBSERVATIONS AND FACTS. G. Kaser, D. R. Hardy, T. Mölg, R. S. Bradley y T. M. Hyera en *International Journal of Climatology*, vol. 24, págs. 329-339; 2004.

ABLATION AND ASSOCIATED ENERGY BALANCE OF A HORIZONTAL GLACIER SURFACE ON KILIMANJARO. T. Mölg, y D. R. Hardy en *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, págs. D16104; 2004.

EXTRACTING A CLIMATE SIGNAL FROM 169 GLACIER RECORDS. J. Oerlemans en *Science*, vol. 308, págs. 675-677; 2005.

KILIMANJARO GLACIERS: RECENT AREAL EXTENT FROM SATELLITE DATA AND NEW INTERPRETATION OF OBSERVED 20TH CENTURY RETREAT RATES. N. J. Cullen, T. Mölg, G. Kaser, K. Hussein, K. Steffen y D. R. Hardy en *Geophysical Research Letters*, vol. 33, pág. L16502, 2006.

OBSERVATIONS: SURFACE AND ATMOSPHERIC CLIMATE CHANGE. Capítulo 3 en *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. K. E. Trenberth *et al.* Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; Cambridge, y Nueva York; 2007.

1. LOS CULTIVOS MODERNOS requieren un abundante suministro de agua y de otros recursos, empobrecen el suelo y contaminan el entorno. Esos inconvenientes se reducirían mediante el cultivo de especies perennes, como los híbridos experimentales de un pariente silvestre perenne del trigo y el triticale.

Vuelta a la agricultura perenne

La agricultura a gran escala sería más sostenible si las principales plantas de cultivo perduraran años y desarrollaran sistemas radiculares profundos

Jerry D. Glover, Cindy M. Cox y John P. Reganold



El sobrepeso es cada vez más común entre los habitantes de los países desarrollados. Comemos más de lo que necesitamos. Ello podría hacernos creer que el sistema de producción de alimentos es sobradamente eficaz. No hay tal. La agricultura moderna requiere campos extensos, con suministro regular de agua, energía y abonos. Ante esas demandas de recursos, la Evaluación del Ecosistema del Milenio en 2005, patrocinada por las Naciones Unidas, afirmó que la agricultura podría convertirse, de entre todas las actividades humanas, en la mayor amenaza para la biodiversidad y la salud de los ecosistemas.

Hoy en día, la mayor parte de los alimentos que consume la humanidad provienen directa o indirectamente (a través del pienso para ganado) del cultivo de cereales, hortalizas y oleaginosas. Esos alimentos básicos resultan atractivos para los productores y consumidores por su fácil transporte y almacenamiento, duración casi indefinida y elevado contenido proteínico y calórico. De ahí que representen en torno al 80 por ciento de las explotaciones agrícolas en el planeta. Pero todos ellos siguen un ciclo anual: las semillas deben sembrarse cada año. Además, suelen cultivarse por métodos intensivos que consumen abundantes recursos. Y más preocupante todavía: el deterioro ambiental que provoca la agricultura se acentuará en los próximos decenios, cuando la población hambrienta se acerque a los ocho o diez mil millones.

Por todo ello, un grupo de agricultores, agrónomos y ecologistas trabaja en el desarrollo de sistemas cerealistas más concordes con los ecosistemas naturales desplazados por la agricultura. La clave del éxito perseguido reside en la transformación de los cereales principales en cultivos perennes, que persisten muchos años. La idea data ya de varios decenios y puede tardar otros más en llevarse a la práctica. Con todo, los últimos avances en mejora vegetal nos dejan vislumbrar la meta.

Las raíces del problema

La mayoría de agricultores y expertos que se han propuesto mejorar los sistemas de cultivo se han inspirado en los aciertos y fracasos de sus contemporáneos. Pero en los años setenta del siglo pasado, Wes Jackson dio un salto atrás de 10.000 años para comparar la agricultura con los sistemas naturales que la precedieron. Antes de que los humanos potenciaran la abundancia de plantas anuales mediante la domesticación y el cultivo, las plantas perennes dominaban casi todos los suelos del globo, como ocurre hoy todavía en las zonas no cultivadas. Más del 85 por ciento de las especies vegetales nativas de América del Norte son perennes.

Jackson observó que las gramíneas y flores perennes de las praderas de Kansas eran sumamente productivas año tras año, al tiempo que generaban y mantenían la riqueza del suelo. Sin necesidad de fertilizantes, plaguicidas ni herbicidas prosperaban y se defendían de plagas y enfermedades. El agua que corría por esas praderas era limpia. Abundaba la vida salvaje.

Las plantas anuales que se cultivaban en los terrenos adyacentes (maíz, sorgo, trigo, girasol y soja), en cambio, exigían cuidados costosos y frecuentes para mantener la productividad. Las plantas anuales desarrollan raíces superficiales (no ahondan más de 30 centímetros); viven sólo hasta la recolección. Ello explicaba que las zonas cultivadas presentaran frecuentes problemas de erosión, empobrecimiento del suelo y contaminación del agua. Además, la extraña placidez de los campos labrados apenas albergaba vida animal. En resumen, la expansión de los monocultivos anuales se había convertido en un problema. La solución yacía bajo los pies de Jackson: los sistemas radiculares perennes, resistentes y diversificados.

Si los cultivos anuales son problemáticos y los ecosistemas naturales ventajosos, ¿por qué no se utilizan especies perennes en los principales cultivos de cereales? La respuesta se halla en los orígenes de la agricultura. Cuando nuestros antepasados del Neolítico comenzaron a recoger plantas con semillas, varios factores debieron inducir que optaran por las anuales.

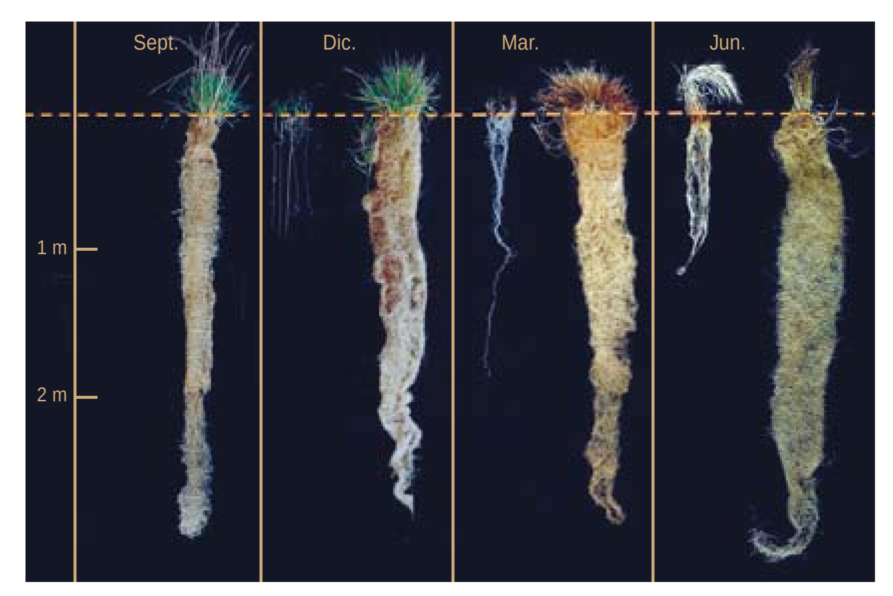
Las primeras plantas en ser domesticadas, la espelta (variedad silvestre del trigo) y la cebada silvestre, tenían unas llamativas semillas de gran tamaño. Para asegurar una buena cosecha cada año, los agricultores primitivos habrían sembrado algunos de los granos recogidos. Sin embargo, dada la amplia variabilidad de los caracteres de las plantas silvestres, se habrían favorecido las semillas con rasgos de



Conceptos básicos

- La agricultura intensiva moderna amenaza la biodiversidad natural y los ecosistemas. Entretanto, la población se disparará hasta los ocho mil o diez mil millones en los próximos decenios, lo que exigirá un aumento importante de la superficie de cultivo.
- La sustitución de los cultivos monoestacionales por otros perennes crearía extensos sistemas radiculares capaces de preservar el suelo; se aplicarían al cultivo de zonas hoy marginales.
- El reto es formidable, pero si se supera, el logro rivalizará con la domesticación original de plantas comestibles que la humanidad ha llevado a cabo en los diez mil últimos años.

MICHAEL S. LEWIS *National Geographic/Getty Images* (*página izquierda*); JIM RICHARDSON (*a la derecha*)





2. LAS PLANTAS PERENNES, como este pariente silvestre del trigo (*Thinopyrum intermedium*) (*derecha, en los paneles de arriba*), cuentan con raíces robustas; ello les facilita el acceso a nutrientes y agua en mayores volúmenes de suelo que las plantas anuales, como el trigo de invierno (*izquierda, en los paneles de arriba*). A su vez, las raíces perennes sostienen microorganismos y otras actividades biológicas que enriquecen el suelo. El suelo oscuro granuloso (*extremo derecho*) extraído de una pradera perenne retiene agua y nutrientes en abundancia; el suelo de un cultivo anual próximo (*derecha*), en cambio, es más ligero, de estructura débil y grumosa.

mayor interés agronómico: cosecha abundante, dispersión fácil y resistencia al destrozo. De ese modo, el laboreo intenso y la aplicación inconsciente de un proceso de selección pronto dio lugar a unas plantas domesticadas anuales más atractivas que sus parientes anuales silvestres. Aunque hubiese también plantas perennes con semillas de buen tamaño, éstas no necesitarían replantarse, ni, por tanto, habrían pasado por ese proceso de selección. Tampoco se habrían beneficiado del mismo.

La solución en las raíces

La valoración de las especies perennes se encuentra en auge. Con sus raíces hundidas, que suelen superar los dos metros de profundidad, las plantas perennes ejercen una regulación crítica de la gestión del agua, los ciclos del carbono y el nitrógeno, amén de otras funciones ecosistémicas. Aunque deban gastar energía en el mantenimiento de un tejido subterráneo que les permita sobrevivir al invierno, las raíces perennes penetran en el suelo hasta encontrar temperaturas cálidas, agua y nutrientes. Siempre dispuestas, muestran una productividad elevada y resistencia a las tensiones ambientales.

En un estudio de los factores de erosión del suelo, que ha abarcado todo un siglo, el heno de fleo (*timothy grass*, una variedad perenne de heno) demostró ser 54 veces más eficaz que los cultivos anuales en el mantenimiento de las capas superficiales. Se ha comprobado también que un suelo plantado de alfalfa y pastos perennes mixtos pierde cinco veces menos agua y 35 veces menos nitratos que otro suelo sembrado con cereales y soja. En comparación con los cultivos anuales, las plantas perennes, con sus raíces profundas y estaciones de crecimiento más prolongadas, aumentan al menos en un 50 por ciento el efecto de secuestro del carbono, componente principal de la materia orgánica del suelo. Al no necesitar replantarse cada año, las especies perennes requieren menos pasadas de la maquinaria agrícola y dosis menores de plaguicidas y abonos, lo que a su vez reduce el uso de combustibles fósiles. Por tanto, esas plantas rebajan la proporción de dióxido de carbono en el aire, a la par que mejoran la fertilidad del suelo.

El agricultor gasta en herbicidas de cuatro a 8,5 veces menos si cultiva plantas perennes en vez de anuales. Resulta ventajoso, además, para la vida salvaje: la densidad de las poblaciones de aves en los cultivos perennes septuplica la registrada en cultivos anuales. Y lo que reviste mayor interés para aplacar el hambre mundial, las plantas perennes son más indicadas para un cultivo sostenible en terrenos marginales, donde el suelo es de baja calidad o se ha empobrecido tras años de cultivo anual intensivo.

Por todas esas razones, en los últimos cinco años se han iniciado en EE.UU. y otros países programas de mejora vegetal para la obtención de cultivos perennes de trigo, sorgo, girasol, trigo silvestre y otras especies. Comparada con la investigación dedicada a los cultivos anuales, la de las especies perennes se halla en sus albores. No obstante, los notables avances conseguidos desde hace unos treinta años harán viable el desarrollo de cultivos de cereales perennes de alto rendimiento en un plazo de 25 a 50 años.

En el desarrollo de cultivos perennes se aplican dos métodos clásicos: la domesticación directa de plantas silvestres y la hibridación de plantas anuales con variedades silvestres emparentadas. Se trata de técnicas complementarias, si bien cada una presenta sus ventajas e inconvenientes.

Evolución asistida

La domesticación directa de plantas silvestres ofrece el camino más simple para la obtención de cultivos perennes. A partir de la observación y selección de determinadas plantas superiores, los agricultores buscan aumentar la frecuencia de los genes que corresponden a rasgos de interés: fácil separación de semillas y cáscaras, buen tamaño y solidez de las semillas, maduración sincronizada, sabor aceptable, fortaleza del

JERRY D. GLOVER (*raíces*); STEVE CULMAN *Universidad de Cornell* (*suelos*); GETTY IMAGES (*tallos de trigo*)

tallo y cosecha abundante. Muchos de los cultivos existentes, como el maíz y el girasol, se prestan bien a ese tipo de domesticación. Los aborígenes norteamericanos, por ejemplo, convirtieron los girasoles silvestres de cáliz y semillas pequeñas en la planta de grandes dimensiones que hoy conocemos.

Los programas actuales de domesticación de cereales perennes se centran en un antepasado silvestre del trigo (*Thinopyrum intermedium*), el girasol de Maximiliano (*Helianthus maximiliani*), la mimosa de la pradera o atado de flores de Illinois (*Desmanthus illinoensis*) y el lino (especie perenne del género *Linum*). De todos ellos, la más avanzada quizá sea la domesticación del *Thinopyrum intermedium*, pariente perenne del trigo.

Los cultivos perennes pueden obtenerse también a partir de plantas de cultivo anual mediante hibridación (la unión de dos especies vegetales distintas). Se reúnen así las mejores cualidades de la planta anual domesticada y de su pariente silvestre. A las propiedades deseables de los cultivos domesticados (rendimiento elevado), se añaden los rasgos que aportan los parientes silvestres (la propia perennidad, resistencia a plagas y enfermedades, etcétera).

De las 13 especies de cereales y oleaginosas más difundidas, 10 admiten hibridación con sus parientes silvestres, según T. Stan Cox, del Instituto de Edafología de Kansas, fundado sin ánimo de lucro por Jackson y otros en pro de una agricultura sostenible. Varios programas de investigación por todo EE.UU. persiguen esos híbridos interespecie e intergénero con miras al desarrollo de versiones perennes del trigo, el sorgo, el maíz, el lino y el girasol oleaginoso.

Durante más de diez años, la Universidad de Manitoba ha investigado el consumo de recursos en sistemas perennes. En la actualidad, varias instituciones canadienses han acometido programas de desarrollo de cultivos perennes. La Universidad del Oeste de Australia ha establecido ya un programa para la obtención de trigo perenne, en el Centro de Investigación Cooperativa para Industrias Agrícolas Futuras de aquel país. Además, en el Instituto de Investigación de Cultivos Alimenticios de Kumming, China, se prosiguen los trabajos iniciados en los años noventa por el Instituto Internacional de Investigación del Arroz para el desarrollo de híbridos del arroz perenne de meseta.



LOS 10 CULTIVOS PRINCIPALES

Los cereales, las hortalizas y las oleaginosas de cultivo anual representaron el 80 por ciento de la cosecha mundial en el año 2004. Más de la mitad de la superficie de cultivo correspondía a los tres cereales principales.

CULTIVO	% DEL TERRENO
1. Trigo	17,8
2. Arroz	12,5
3. Maíz	12,2
4. Soja	7,6
5. Cebada	4,7
6. Sorgo	3,5
7. Semillas de algodón	2,9
8. Habichuelas	2,9
9. Mijo	2,8
10. Semillas de colza/mostaza	2,2

GETTY IMAGES (*soja*)

En el Instituto de Edafología mencionado, se trabaja en la domesticación de ciertas plantas con espiga perennes y en el cruzamiento de gramíneas perennes (*Th. intermedium*, *Th. ponticum* y *Th. elongatum*) con trigos anuales. En la actualidad, se someten a criba unas 1500 de esas especies híbridas y miles de su progenie para descubrir rasgos perennes. La obtención de esos híbridos es un proceso laborioso y lento. Una vez identificados los candidatos para la hibridación, se realizan intercambios génicos mediante la polinización cruzada entre un gran número de plantas de especies dispares, se selecciona la progenie con caracteres de interés y se repite una y otra vez ese ciclo de cruzamiento y selección.

Con todo, la hibridación constituye un método más rápido que la domesticación para la obtención de una planta de cultivo perenne. Suele requerir también mayor esfuerzo técnico para superar incompatibilidades genéticas entre las plantas progenitoras. Pensemos en que una semilla obtenida del cruzamiento de dos especies de parentesco distante termina a menudo en aborto, antes de su plena maduración. Para obviar ese problema, la semilla se “rescata” en estado embrionario; se hace crecer en un medio artificial hasta que echa unas pocas hojas y raíces; por fin, el retoño se transfiere a la tierra para que prospere como cualquier otra planta. Pese a todo, al llegar a la fase de reproducción, las anomalías génicas del híbrido suelen manifestarse en una incapacidad para producir semilla.

En general, la esterilidad parcial o total de un híbrido se debe a la presencia de cromosomas parentales incompatibles. Para producir huevos o polen, los cromosomas de un híbrido deben emparejarse durante la meiosis (proceso de división en dos mitades de las células sexuales en preparación para la unión con otro gameto) e intercambiar información génica. Si los cromosomas no encuentran pareja porque las versiones de los progenitores difieren demasiado, o varían en número, el proceso de meiosis fracasa.

El problema en cuestión admite varias soluciones. Dado que los híbridos estériles suelen ser incapaces de producir gametos masculinos pero son parcialmente fecundos en la producción de gametos femeninos, la polinización de estos híbridos con uno de sus progenitores originales (retrocruzamiento) restaura la fecundidad. Otra estrategia consiste en duplicar el número de cromosomas, ya sea de forma espontánea o por la adición de compuestos químicos como la colquicina. Aunque el emparejamiento de cromosomas se logra por uno y otro método, en los híbridos de trigo perenne se produce a menudo una nueva eliminación de cromosomas en cada generación sucesiva, sobre todo en los cromosomas heredados del progenitor perenne.

Dada la complejidad del acervo génico que se obtiene mediante la hibridación de especies distantes, una vez identificados los híbridos perennes fértiles, se aplican técnicas biológicas para revelar a qué progenitor corresponden las partes del genoma de la progenie. Una de esas



Trigo perenne experimental

AGRICULTURA SOSTENIBLE: LO NUEVO Y LO ACTUAL

Las posibles ventajas de las futuras plantas de cultivo perenne se infieren de la comparación de un pariente perenne silvestre del trigo (*abajo, izquierda*) con el trigo anual domesticado que crece a su vera (*abajo, derecha*). Aunque un trigo perenne llegara a dar granos similares a los del cultivo anual, podría perdurar muchos años; bajo tierra guardaría mayor semejanza con el pariente silvestre. Los cultivos perennes transformarían el proceso y las repercusiones de la explotación agrícola, mediante una gestión más eficaz de los recursos; ello comportaría una menor dependencia de la aportación humana y una productividad mayor durante un tiempo más prolongado. Además, las plantas perennes consolidan y sostienen el ecosistema que las nutre; las anuales de raíz corta y vida breve, en cambio, dejan perder agua, suelo y nutrientes.

PERENNES

La fotosíntesis captura el carbono atmosférico

Tras recoger la cosecha, el ganado pastaría en la vegetación

Las raíces competitivas rechazan las malas hierbas con menos herbicidas

La vida salvaje prospera en el refugio vegetal

El recrecimiento estacional de raíces o rizomas prolonga el período productivo

Las raíces capturan y utilizan más agua de lluvia

Diversos tipos de cultivos perennes compartirían un mismo suelo, penetrando sus raíces a distintos niveles

Las raíces que penetran hasta dos o más metros filtran al suelo azúcares vegetales ricos en carbono, que alimentan organismos que producen y consumen otros nutrientes. También las raíces contribuyen al secuestro de carbono

EL FACTOR CARBONO

En los cultivos perennes, el potencial de calentamiento global (gases de invernadero emitidos a la atmósfera como resultado de las operaciones de cultivo, menos el carbono secuestrado en el suelo) es negativo. También se espera que las plantas perennes, más resistentes, se comporten mejor que las anuales en un clima que tiende a caldearse.

CARBONO SECUESTRADO EN EL SUELO
(kilogramos por hectárea y año)

Cultivos anuales: 0 a 450
Cultivos perennes: 320 a 1100

POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL
(kilogramos de CO_2 equivalentes por hectárea y año)

Cultivos anuales: 140 a 1140
Cultivos perennes: –1050 a –200

ESTIMACION DEL IMPACTO EN LA COSECHA DE UN AUMENTO TERMICO DE 3 ºC A 8 ºC
(megagramos por hectárea)

Cultivos anuales: –1,5 a –0,5
Cultivos perennes: +5



JIM RICHARDSON (*sección transversal del suelo*); INSTITUTO DE LA TIERRA (*insertos de la página izquierda*); JIM RICHARDSON (*maquinaria agrícola*); SEAWIFS PROJECT (NASA/GSFC) Y GEOEYE (*zona muerta*); KEN CEDENO (*tierra labrada*); JACK DYKINGA *USDA/ARS* (*erosión*); GETTY IMAGES (*tallos de trigo*)

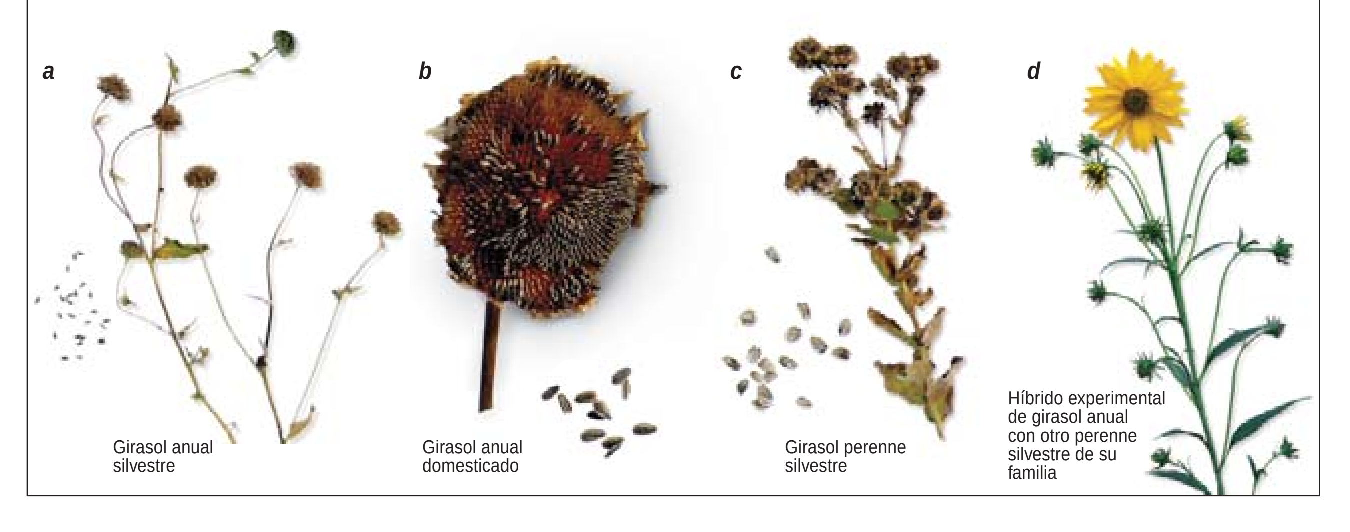
técnicas, la hibridación genómica *in situ*, distingue los cromosomas del progenitor perenne de los del progenitor anual mediante fluorescencia cromática; además, detecta anomalías cromosómicas como la reordenación entre cromosomas sin parentesco. Tales medios de análisis imprimen mayor rapidez a los programas de cruzamiento, una vez descubiertas las combinaciones de cromosomas deseables e indeseables, sin comprometer por ello la posibilidad de utilizar las semillas perennes en agricultura biológica, donde no se permite la manipulación genética de los cultivos.

Otra técnica valiosa para acelerar y depurar los métodos tradicionales de mejora vegetal estriba en la selección asistida por marcador. Unas secuencias de ADN asociadas con determinados caracteres operan como marcadores para la selección de los retoños que aporten los rasgos de interés, sin tener que esperar a que las plantas alcancen su madurez [*véase* "Mejora genética de cereales", por Stephen A. Goff y John M. Salmeron; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2004]. Por el momento, no existen marcadores específicos para la obtención de plantas perennes, pero es cuestión de tiempo. Un grupo de científicos de la Universidad estatal de Washington han determinado que el cromosoma 4E de la gramínea *Th. elongatum* es necesario para un importante carácter de perennidad: el nuevo crecimiento que sigue a un ciclo de reproducción sexual. La identificación, en la región del 4E, del gen o genes correspondientes a ese carácter, revelaría los marcadores del ADN que ahorrarían a los agrónomos un año de crianza para la evaluación de especies híbridas.

Pese a todo, la adquisición de la condición de perenne es un camino tortuoso, que va mucho más allá de la obtención de un rasgo o de un gen solitarios. Ante la complejidad que entraña, resulta poco probable que la modificación transgénica (inserción de ADN extraño) propicie el desarrollo de cereales perennes, al menos en principio. En el futuro, las técnicas transgénicas quizás ayuden a refinar caracteres heredados sencillos. Por ejemplo, en una gramínea perenne domesticada que se haya desarrollado con éxito pero que carezca de la combinación de genes de gluten y

OBTENCION DE UN NUEVO CULTIVO

Para desarrollar cultivos perennes de alto rendimiento hay dos métodos: la domesticación de una planta perenne silvestre, con el fin de mejorar sus rasgos, y la hibridación de una planta de cultivo anual con una perenne silvestre de la misma familia, para reunir las mejores cualidades de ambas. Cada uno de ellos exige un proceso laborioso y lento de cruzamiento y análisis. Los aborígenes americanos domesticaron durante miles de años el girasol silvestre anual de semilla pequeña (*a*) para convertirlo en la moderna planta de cosecha anual (*b*), a través de la selección y cultivo de plantas con rasgos de interés agronómico: semillas grandes y rendimiento elevado. En la actualidad se trabaja en la domesticación directa de especies perennes de girasol (*c*), así como en la obtención de híbridos de plantas anuales modernas y silvestres perennes (*d*).



proteínas que exige un pan de buena calidad, pueden insertarse los genes de gluten correspondientes extraídos del trigo anual.

Gestión de los recursos

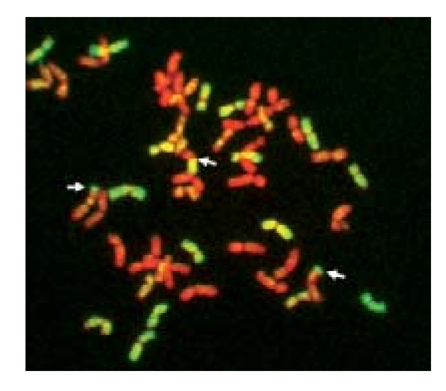
Hay cultivos perennes extendidos por el mundo entero; así, la alfalfa y la caña de azúcar. Con ninguno, sin embargo, se han obtenido rendimientos equiparables a los de los cultivos de cereales anuales. Parece contraintuitivo que las plantas puedan, a la vez, asignar recursos para la formación y el mantenimiento de sistemas radiculares perennes y producir cosechas abundantes. El carbono, capturado mediante la fotosíntesis, corresponde al principal elemento constructor vegetal y debe distribuirse por toda la planta.

Quienes cuestionan la posibilidad de que las plantas perennes ofrezcan un buen rendimiento en semillas suelen aducir tales transacciones fisiológicas; dan por supuesto que la planta dispone de una cantidad fija de carbono y, por tanto, el carbono que se destine a las semillas se retraerá del que pudiera ir a las estructuras que permiten el carácter perenne, como raíces y rizomas. A menudo, sin embargo, olvidan que los tiempos de vida de las plantas perennes abarcan un amplio espectro: hay pratenses que viven entre 50 y 100 años, mientras que otras alcanzan sólo unos pocos años. Por suerte, las plantas son organismos flexibles: responden a presiones de selección que hacen variar su consumo total de carbono según las condiciones ambientales y modificar las proporciones en que se reparte tal consumo.

Una especie perenne silvestre hipotética podría vivir 20 años en un entorno natural competitivo y producir sólo escasas semillas al año. Consumiría poco carbono, en su mayor parte invertido en defenderse de plagas e infecciones, competir por unos recursos escasos y subsistir en condiciones variables. Cuando se saca esa especie silvestre fuera de su hábitat, limitado en recursos, y se la sitúa en un entorno controlado, su consumo total de carbono crece repentinamente; la planta aumenta de tamaño.

Andando el tiempo, también podrán modificarse las porciones en que se reparte ese mayor consumo de carbono. La mejora vegetal que llegó con la Revolución Verde, combinada con una aplicación más intensa de abono, doblaron de lejos el rendimiento anual de cultivos de cereales anuales, y ello sucedió en plantas que no tenían estructuras perennes que sacrificar. Una parte de ese impresionante aumento de la producción se consiguió mediante la selección de las plantas que producían menos masa de tallo y hojas, y, por tanto, dedicaban mayor proporción de carbono a la producción de semillas.

De modo análogo, en los cultivos de cereales perennes es posible aumentar el rendimiento sin eliminar los órganos y estructuras requeridos para sobrevivir al invierno. De hecho,



3. LOS CROMOSOMAS de una planta híbrida experimental de trigo perenne se marcan por fluorescencia para distinguir si proceden del progenitor silvestre perenne (*verde*) o del trigo (*rojo*). La técnica ayuda a identificar las combinaciones de cromosomas deseables, al propio tiempo que resalta las anomalías, como la fusión de cromosomas (*flechas*).

INSTITUTO DE LA TIERRA (*girasoles*); CINDY M. COX (*cromosomas*)





4. EL CRUZAMIENTO requiere la extracción de un embrión del ovario (*izquierda*). Un investigador tapa con bolsas espigas de sorgo anual para recoger polen (*derecha*); al fondo, plantas perennes de sorgo.

un gran número de especies perennes, de tamaño mayor que las anuales, ofrecen más posibilidades de destinar a las semillas el carbono consumido en crecimiento vegetativo. Bastarían entre 5 y 10 años para que un cultivo de cereales perennes atendiera debidamente las necesidades humanas, quizá.

En otras palabras, la planta silvestre perenne está innecesariamente "sobredimensionada" para perdurar en un entorno de explotación agrícola. Podría dedicar a la producción de semillas buena parte del carbono que destina a mecanismos de supervivencia, que en un cultivo ya no le serían necesarios, como el que le permite resistir a la sequía.

Una agricultura más verde

Podemos imaginar el día en que, de aquí a medio siglo, se extiendan por el mundo campos de cultivos perennes. Se parecerán mucho a las praderas de Kansas que recorría Wes Jackson; además, producirán alimentos. Bajo tierra coexistirían raíces perennes de varios tipos —parecidas unas a las largas y afiladas raíces de la alfalfa, y otras a la maraña de raíces fibrosas de las gramíneas—, que se asentarían en diferentes capas del suelo. Para prolongar la estación de crecimiento del conjunto se cultivarían a la vez especies con hábitos de crecimiento estacional alternativos. La disminución de la demanda de recursos y la ampliación de la biodiversidad beneficiarían al entorno y al agricultor.

Las condiciones globales —agrícolas, ecológicas, económicas y políticas— van cambiando muy deprisa, en una dirección que podría estimular la obtención de cultivos perennes. Así, al aumentar en EE.UU. y Europa la presión por reducir o eliminar las subvenciones a la agricultura, sostén fundamental de los cultivos anuales, se podrían destinar más fondos a la investigación sobre especies perennes. Dado que los precios de la energía se disparan y crece la sensibilidad ambientalista, se comprenderá mejor en el orden político la asignación de dinero público a proyectos a largo plazo para reducir el consumo de recursos y el empobrecimiento del suelo.

El lejano horizonte de la obtención de cultivos perennes frena la inversión del sector privado. Por eso, se necesita la subvención gubernamental o la aportación filantrópica para financiar equipos de científicos y programas de investigación. Tal vez las compañías comerciales obtengan menos lucro en la venta de abonos y plaguicidas a los agricultores de cereales perennes, pero es de suponer que se adaptarán a los nuevos cultivos con la oferta de otros productos y servicios.

Sin duda la producción de cereales anuales será aún importante dentro de 50 años; podría haber dificultades para convertir en perennes ciertos cultivos, como la soja. Además, esa transformación no erradicará las plagas, las malas hierbas, la pérdida de fertilidad del suelo y otros problemas. Pero las raíces profundas son más resistentes. Una agricultura basada en cultivos perennes nos dotará de mayor libertad para elegir qué sembrar y dónde, al tiempo que mantendrá una producción de alimentos suficiente para abastecer a una población mundial en continuo crecimiento.

Los autores

Jerry D. Glover es agroecólogo y director de investigación en el Instituto de Edafología de Salina (Kansas), organización sin ánimo de lucro dedicada a la educación e investigación en agricultura sostenible. **Cindy M. Cox,** experta en patología y genética vegetal, trabaja en el Programa de Mejora Vegetal del mismo instituto. **John P. Reganold**, profesor Regents de Ciencia del Suelo en la Universidad estatal de Washington en Pullman, es especialista en agricultura sostenible.

Bibliografía complementaria

PERENNIAL GRAIN CROPS: AN AGRICULTURAL REVOLUTION. Preparado por Jerry D. Glover y William Wilhelm. Edición especial de *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 20, n.º 1; marzo de 2005.

WES JACKSON (35 WHO MADE A DIFFERENCE). Craig Canine en la edición especial de aniversario de *Smithsonian*, vol. 36, n.º 8, págs. 81-82; noviembre de 2005.

PROSPECTS FOR DEVELOPING PERENNIAL GRAIN CROPS. Thomas S. Cox, Jerry D. Glover, David L. Van Tassel, Cindy M. Cox y Lee D. DeHaan en *BioScience*, vol. 56, n.º 8, págs. 649-659; agosto de 2006.

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE AGRICULTURAL BIO-ECONOMY. Nicholas Jordan y otros en *Science*, vol. 316, págs. 1570-1571; 15 de junio, 2007.

INSTITUTO DE LA TIERRA (*arriba a la izquierda*); JIM RICHARDSON (*arriba a la derecha*); GETTY IMAGES (*abajo*)

¿Existen estrellas de

Las estrellas de neutrones reúnen condiciones extremas. Parece que en su interior se desarrollan procesos mucho más extraños de lo que se venía suponiendo

Markus Thoma

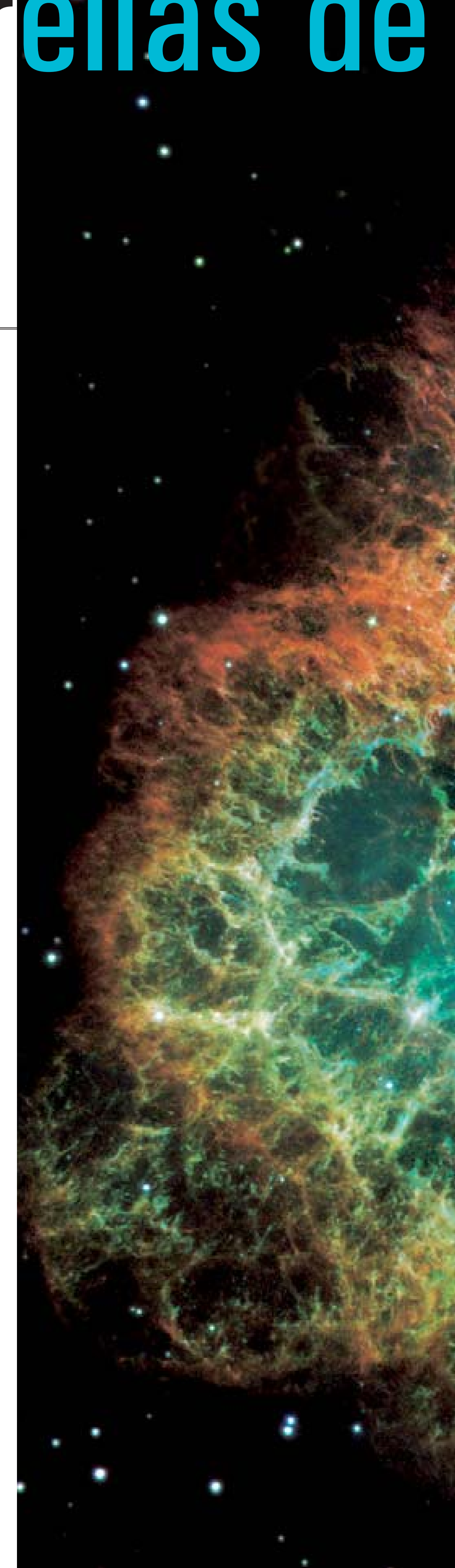
Quark: pocos habrá que no hayan oído o leído esta palabra en alguna parte. Muchos, sin embargo, no sabrán lo que significa exactamente; sólo tendrán claro que no se refiere a un producto lácteo. Cuando los físicos hablan de "quarks" tienen en mente partículas sumamente pequeñas, sillares fundamentales de la materia.

El concepto se originó en 1964. Los físicos teóricos Murray Gell-Mann y George Zweig mostraron por entonces que los protones y neutrones —diminutos componentes de los núcleos atómicos— constaban de unidades todavía más pequeñas. Gell-Mann, que recibió el premio Nobel en 1969 por su teoría, las denominó "quarks", según un ripio del escritor irlandés James Joyce, incluido en su novela *Finnegans Wake*, donde se lee "Three quarks for Muster Mark". El significado de "quark" no está ahí nada claro; seguramente Joyce convirtió la palabra "quart" (un cuarto de litro de cerveza) en "quark" por su semejanza fonética. Puede tratarse también de una alusión a la palabra "squawk" (con el sentido de "graznido"), que en dialecto se pronuncia "quawk".

Otro famoso físico de los años sesenta fue Richard Feynman, conocido por su sentido del humor, que propuso para la partícula recién descubierta el nombre de "partón", aludiendo a la cantante de country Dolly Parton. Hay físicos que emplean todavía ese término.

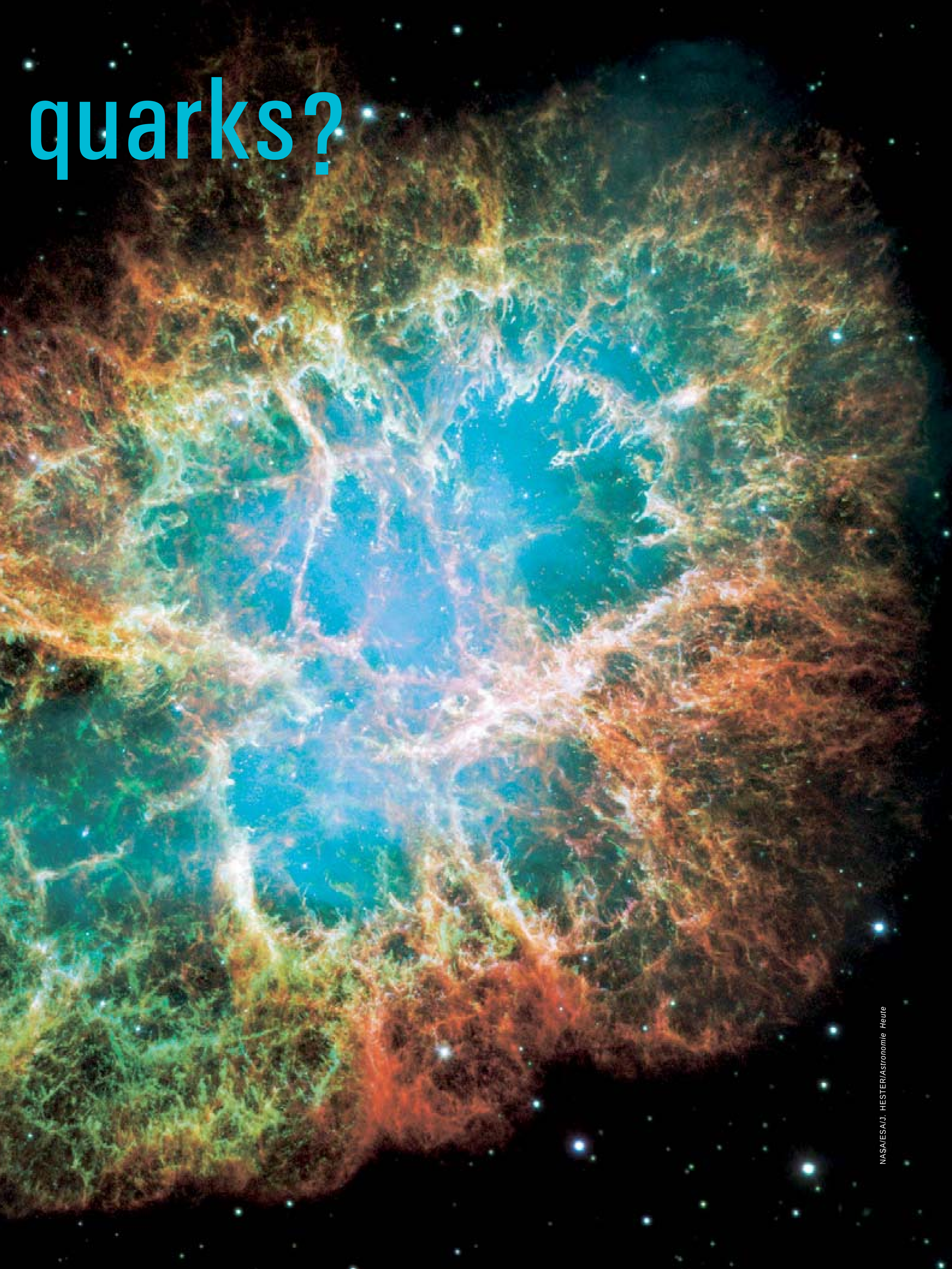
A finales de los años sesenta quedó demostrada la existencia de los quarks, con experimentos en un acelerador de partículas. La física actual distingue entre seis clases de quarks, que difieren entre sí por su masa, su carga eléctrica y su isoespín (una suerte de momento de torsión). No sólo se unen para formar protones y neutrones; componen también otras partículas, como los piones, que se generan en las reacciones nucleares. Por todo lo que sabemos, los quarks no aparecen como partículas libres, sino que se disponen siempre en paquetes de mayor tamaño (los protones, por ejemplo), en los que se mantienen unidos por gluones (de *glue*, en inglés pegamento).

Desde hace casi cuarenta años, se viene conjeturando que los quarks podrían existir como partículas libres —es decir, en la forma de una "materia de quarks"— en las estrellas de neutrones. ¿Por qué precisamente ahí? Para contestar a esta pregunta debemos abordar la física de ese tipo de estrellas.



1. LA NEBULOSA DEL CANGREJO en el Toro es la antigua envoltura de una estrella que hace mil años se desplomó. En su centro gira una estrella de neutrones. ¿O tal vez una estrella de quarks?

quarks?



NASA/ESA/J. HESTER/*Astronomie Heute*



ESA/*Astronomie Heute*

2. XMM-NEWTON, observatorio de rayos X de la Agencia Espacial Europea, se encuentra desde 1999 en el espacio. Permite investigar estrellas de neutrones. Bien visibles son las aberturas del telescopio en la parte delantera.

Esferas peculiares

Las estrellas de neutrones son restos de supernovas, explosiones gigantescas de la envoltura de una estrella vieja que ha consumido su reserva de energía. La masa de la estrella debe quintuplicar al menos la solar para que ese cuerpo celeste pueda convertirse en supernova. El núcleo de la estrella, que pesa de una a dos masas solares, se desploma en la explosión y se contrae hasta formar una bola de veinte a treinta kilómetros de diámetro, constituida por neutrones muy compactados y con una densidad 300 billones de veces superior a la densidad del agua. Una cucharadita de té de semejante concentrado de neutrones pesaría en la balanza 300 millones de toneladas.

La fuerza de atracción de este cadáver estelar es tan intensa, que una nave espacial, con toda su tripulación, que aterrizara en su superficie se aplastaría al instante en una capa uniforme, con un grosor de 0,0000001 milímetros. Las montañas más conspicuas de la estrella no llegan a alcanzar un milímetro de altura. Una estrella de neutrones se asemeja en muchos aspectos a un núcleo atómico gigantesco.

La existencia de estrellas de neutrones se predijo poco después del descubrimiento del neutrón en 1932. Robert Oppenheimer desarrolló en 1939, junto con sus colaboradores, los fundamentos teóricos de la descripción de tales estructuras. Tuvieron para ello que partir de la teoría general de la relatividad de Einstein, y llegaron a la ecuación de Tolman-Oppenheimer-Volkoff, que describe la estructura de las estrellas de neutrones. Con esa fórmula nos es permitido determinar qué masa debe tener la estrella de neutrones para poseer cierto radio. Dependiendo de la interacción entre los neutrones que se suponga, se obtienen diferentes curvas. Todos los modelos predicen, sin embargo, que no existen estrellas de neutrones con más de dos masas solares. De hecho, la mayoría de las que conocemos alcanzan 1,4 masas solares, aproximadamente.

¿Señales Morse procedentes del universo?

En el año 1967 se produjo una noticia extraordinaria: Jocelyn Bell y Anthony Hewish descubrieron, con su radiotelescopio de Cambridge, una radiofuente celeste que enviaba de modo regular cortos impulsos. ¿Podría tratarse de vida inteligente que radiaba mensajes cósmicos? Bell y Hewish bautizaron a sus radiofuentes pulsantes “Little Green Man One” (Homúnculo verde uno).

No tardaron en identificarse otras radiofuentes de ese tipo. Y pronto llegó la explicación de su comportamiento, sin apelar a la supuesta vida extraterrestre. Según la teoría, tales radiopulsos eran causados por estrellas de neutrones en rápida rotación, que poseían un campo magnético gigantesco. Las ondas de radio emitidas sólo pueden salir a lo largo del eje del campo magnético. En la mayoría de las estrellas de neutrones, lo mismo que en la Tierra, el eje del campo magnético no coincide con el eje de rotación; por eso, el eje magnético gira vertiginosamente y con él lo hace el cono de la radiación de las ondas de radio. Se origina así un faro cósmico. Cuando el cono de radiación pasa sobre nosotros, se nos aparece en forma de una serie de pulsos de radio que retornan periódicamente, motivo por el cual se ha llamado pulsares a dichos objetos.

Las estrellas de neutrones giran con una velocidad celerísima si lo

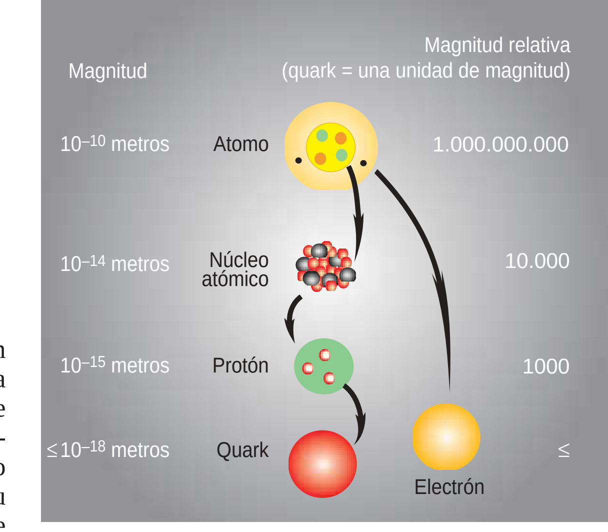
comparamos con su diámetro de algunas decenas de kilómetros. Para dar una vuelta algunas necesitan unas milésimas de segundo. Ese fenómeno y la intensidad fortísima de sus campos magnéticos (cientos de billones de veces más intensos que el campo magnético terrestre) hallan explicación en el propio colapso de la estrella moribunda.

En una supernova, el núcleo se encoge cien mil veces. Su velocidad de giro aumenta entonces drásticamente, porque debe conservarse el momento angular, ni más ni menos que lo que ocurre con una patinadora sobre hielo, que gira sobre su eje cada vez más deprisa al recoger sus brazos. La energía del campo originario no puede desaparecer sin más: al contraerse el núcleo de la estrella, se contrae también el campo magnético y, por tanto, éste debe intensificarse.

Una estrella en el cielo de mediodía

En la constelación del Toro se encuentra el pulsar más famoso (*véase la figura 1*). Allí estalló en 1054 una supernova, visible desde la Tierra, incluso con luz diurna, según relatan chinos y otros pueblos que dejaron mención del fenómeno. La cubierta de la estrella originaria, que sigue dispersándose, forma la actual nebulosa del Cangrejo. En su centro se encuentra el pulsar que con su radiación produce la luminosidad de la nebulosa. Su período de rotación es de 33 milésimas de segundo. No sólo emite ondas de radio, sino también luz visible y rayos X.

Volvamos a los quarks. ¿Por qué podría haber estrellas de neutrones compuestas de materia quark? La razón estriba en su interior, donde reinan condiciones extremas. Nuestros modelos indican que allí la densidad decuplica la atribuida en un núcleo atómico. De ser cierta la hipótesis, los neutrones casi se deshacían, análogamente a un saco de naranjas que se aplastase hasta convertirse en zumo. En vez de neutrones individuales tendríamos entonces una sopa de quarks, la materia quark.



3. LOS QUARKS son por lo menos cien millones de veces más pequeños que un átomo. Cuando tres quarks forman un protón o un neutrón, estas partículas son mil veces mayores que ellos.

Se trataría de un estado especial de la materia: firme, fluido, gaseoso y semejante al estado de plasma tal y como se presenta en las estrellas calientes.

En el universo primitivo, transcurridas millonésimas de segundo desde la gran explosión, reinaba una densidad tan grande como en las estrellas de neutrones, pero a una temperatura mucho más alta. Es decir, al principio el universo estaba formado probablemente de materia quark. Se intenta reproducir ese estado en el laboratorio. El acelerador de partículas de Brookhaven, en Nueva York, y el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, en Ginebra, que entrará

RETRATO DE LOS QUARKS

Los quarks, junto con los electrones y neutrinos, son, que se sepa, los ladrillos más pequeños de la materia. Componen, entre otras partículas, a los protones y neutrones. Se presentan en seis clases diferentes: arriba, abajo, extraño, encanto, fondo y cima. Los protones y neutrones están formados por los quarks más ligeros, el arriba y el abajo (pesan unos 10^{-27} gramos). Los quarks más pesados, extraño, encanto, fondo y cima, aparecen solamente en partículas inestables y de corta vida, sea en los rayos cósmicos o en experimentos de los aceleradores. El quark más pesado, el cima, que pesa unas 50.000 veces más que sus hermanos arriba y abajo, fue descubierto en experimentos de aceleradores de partículas hace algunos años.

Todos los quarks poseen espín —momento angular intrínseco— 1/2 (en unidades de la constante de Planck). Tienen una carga eléctrica, que corresponde a un tercio o dos tercios de la carga elemental, con signo más o signo menos según el tipo de quark.

Como no se han podido detectar cargas elementales fraccionarias, se cree que los quarks nunca aparecen libres, sino siempre en paquetes cerrados. Así, por ejemplo, dos quarks arriba y uno abajo forman un protón, que posee una carga eléctrica de más uno; dos quarks abajo y uno arriba forman un neutrón con carga cero.

Esta unión se produce por la interacción entre quarks, que a su vez es originada por otras partículas. Por ejemplo, dos electrones cargados negativamente se repelen por el intercambio de fotones. Los quarks no sólo intercambian fotones, sino también gluones, que los pegan formando paquetes.

PROPIEDADES DE LOS QUARKS

Tipo de quark	Carga (en unidades de la carga elemental)	Masa (en 10^{-30} kg)
arriba	$+2/3$	≈ 5
abajo	$-1/3$	≈ 10
extraño	$-1/3$	≈ 200
encanto	$+2/3$	≈ 2200
fondo	$-1/3$	≈ 7600
cima	$+2/3$	≈ 315.000

AH, SIGANIM/*Astronomie Heute*



4. EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES, gigantesco acelerador de partículas en Ginebra, mide 27 kilómetros de longitud.

pronto en funcionamiento, disparan con alta energía núcleos atómicos que chocan entre sí. En la colisión aumenta la densidad de los núcleos de tal manera, que por muy corto tiempo —durante sólo unos 10^{-23} segundos— debe de haber una bola de fuego caliente de materia quark. Se han encontrado ya indicios de que eso es realmente lo que acontece.

Queda un segundo motivo por el cual una estrella de neutrones podría ser una estrella de quarks. Edward Witten, de Princeton, estableció la tesis según la cual cierta forma de materia quark, la "materia quark extraña", representaría la forma más estable de materia del universo. Se trata de una mezcla de tres tipos de quarks diferentes, los quarks arriba, abajo y extraño. De los dos primeros tipos se componen los protones y neutrones. Los quarks extraños se presentan en otras partículas elementales, los hiperones.

Las consideraciones de Witten indican que la materia quark extraña puede superar la estabilidad del hierro, el elemento más estable del universo. La veracidad de esta conjetura depende de la interacción entre los quarks, cuestión de la que sabemos muy poco. Si Witten anda en razón, durante un proceso muy energético —por ejemplo una supernova— podría generarse una estructura compuesta por entero de materia quark extraña, no una estrella de neutrones.

El fin de la Tierra

Hace unos años aparecieron inquietantes titulares en la prensa. Declaraban que en los experimentos con el acelerador de iones pesados de Brookhaven podrían formarse gotitas de materia quark extraña. Si fueran más estables que la materia circundante, se convertirían en semillas de condensación que transformarían toda la materia circundante en materia quark extraña. Se produciría una reacción en cadena, con la que, al cabo de poco tiempo, la Tierra se habría convertido en una bola de cien metros.

Pero los cálculos indicaban que una catástrofe de este tipo era sumamente improbable. Sin ir más allá, la Luna habría ya dejado de existir; en efecto, sometida a un bombardeo continuo de radiación cósmica de alta energía, debería haberse convertido en materia quark extraña.

Las estrellas de neutrones podrían tener un núcleo de materia quark rodeado de un manto de neutrones —hablaríamos entonces de estrellas híbridas—, o un núcleo constituido enteramente por quarks extraño. ¿Cómo saber si es así? De las diversas propuestas de respuesta esbozadas mencionaré las dos más prometedoras.

Por un lado, los cálculos de Fridolin Weber, de la Universidad de San Diego, demostraron que los cadáveres de estrellas que giran sobre sí mismos en menos de una milésima de segundo no pueden estar compuestos de neutrones. Los dispersarían las enormes fuerzas centrífugas que se originan. La materia quark, por el contrario, es más estable y soporta velocidades de rotación más altas. El pulsar más rápido conocido hasta ahora, PSR J1748-2446ad, rota una vez en una milésima y media de segundo; en teoría podría hallarse formado por neutrones.

Por otra parte, las estrellas de neutrones deben tener un determinado diámetro mínimo, que sería de alrededor de 15 kilómetros. Cabe que en las estrellas de quarks no suceda así. De los cálculos que Klaus Schertler y yo mismo hemos realizado en la Universidad de Giesen, se deduce lo siguiente: las estrellas de quarks tienen a igualdad de masa un diámetro menor que las estrellas híbridas. Estas últimas, a su vez, son por término medio un treinta por ciento menores que las estrellas de neutrones. La razón es que la materia quark está más comprimida que los neutrones densamente empaquetados.

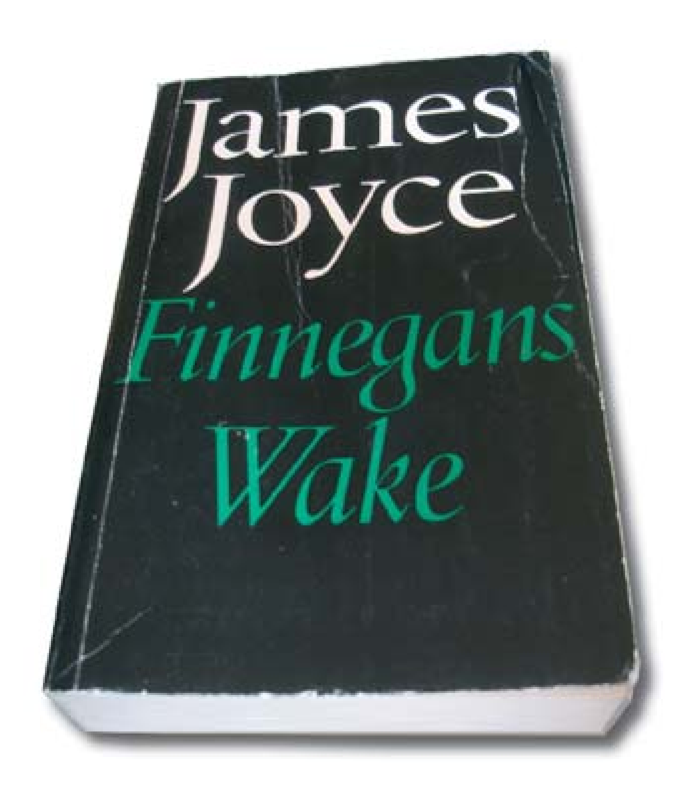
Pero, ¿cómo podemos determinar el diámetro de una estrella de neutrones o de una estrella de quarks? Una estrella de neutrones que esté a trescientos años luz presenta, vista desde la Tierra, un diámetro aparente menor que un pelo situado en la superficie de la Luna. Una medida directa del diámetro estelar no es posible ni siquiera con los mayores telescopios.

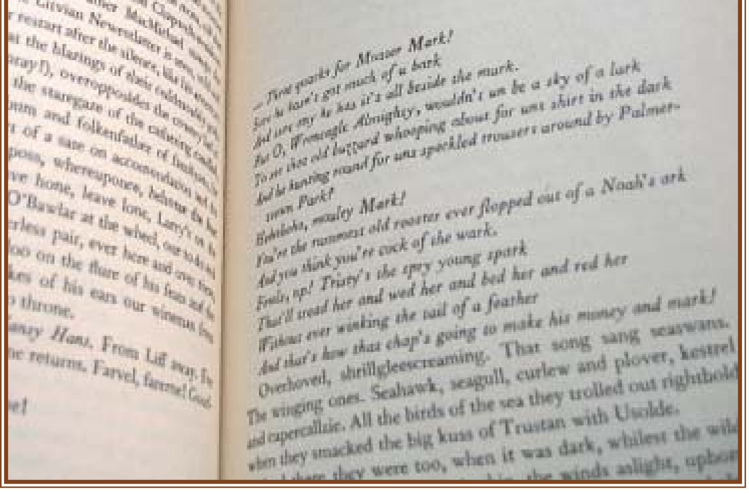
Afortunadamente, la física viene en nuestra ayuda. Los objetos calientes emiten radiación electromagnética, cuya intensidad está determinada por el tamaño de su superficie. Cuanto mayor un objeto, mayor su radiación. Además, la longitud de onda de la radiación depende de la temperatura del objeto: cuanto más caliente, la longitud de onda es más corta. La superficie de las estrellas de neutrones tiene una temperatura de entre 500.000 y 1.000.000 de grados Celsius y emite sobre todo rayos X duros, de longitud de onda muy corta. Por eso son muy luminosas en rayos X, mientras que apenas si se dejan percibir con los mayores telescopios de luz visible. Si obtenemos la intensidad de la radiación de rayos X de una estrella de neutrones, podremos estimar a partir de ese parámetro su tamaño, siempre y cuando conozcamos su distancia.

Alegría prematura

En 1992 el satélite Rosat, con su telescopio de rayos X, descubrió la


CERN/*Astronomie Heute*





— Three quarks for Muster Mark!
Sure he hasn't got much of a bark
And sure any he has it's all beside the mark.
But O, Wreneagle Almighty, wouldn't un be a sky of a lark
To see that old buzzard whooping about for uns shirt in the dark
And he hunting round for uns speckled trousers around by Palmer-
stown Park?
Hohohoho, moulty Mark!
You're the rummest old rooster ever flopped out of a Noah's ark
And you think you're cock of the wark.
Fowls, up! Tristy's the spry young spark
That'll tread her and wed her and bed her and red her
Without ever winking the tail of a feather
And that's how that chap's going to make his money and mark!
Overhoved, shrillgleescreaming. That song sang seaswans.
The winging ones. Seahawk, seagull, curlew and plover, kestrel
and capercallzie. All the birds of the sea they trolled out rightbold
when they smacked the big kuss of Trustan with Usolde.

5. JAMES JOYCE (1882-1941) incluyó en un pasaje de su novela *Finnegans Wake* el sustantivo *quark*, en plural. El raro verbo *quark* significa “graznar” o “croar”; por otra parte, da la impresión de que el contexto liga el inventado sustantivo a graznidos o chillidos (*squawks*) de pájaros. Sin embargo, por posible afinidad fonética, artificio al que constantemente recurre Joyce en su libro, podría también pensarse en cuartos (*quarts*) de cerveza, tal y como hizo Murray Gell-Mann, que se valió de la palabra para denominar al nuevo tipo de partículas elementales que había propuesto (por entonces con sólo tres variedades, como los tres *quarks* que Joyce dedica al rey Mark, el de la historia de Tristán e Isolda).

estrella de neutrones RXJ1856. Más tarde, la observaron con mayor precisión el satélite Chandra de la NASA y el XMM-Newton de la Agencia Espacial Europea. Se comprobó que la radiación de rayos X de la estrella de neutrones procedía sólo de su caliente superficie. Esto permitió poner su radiación de rayos X en relación directa con el tamaño estelar. En 1997 el telescopio espacial Hubble logró detectar su imagen, extremadamente débil (magnitud 26), en luz visible y determinar su distancia: unos 380 años luz. A partir de la intensidad de rayos X medida y de esa distancia, se obtuvo un diámetro de sólo nueve kilómetros. Se había descubierto la primera estrella de quarks. O lo parecía.

Pero pronto surgieron dudas sobre tal interpretación. La medición del espectro de la estrella de neutrones en el dominio de la luz visible contradecía las medidas anteriores. En luz visible aparecía la estrella la mitad de caliente de lo que el espectro de rayos X hacía pensar. ¿Cómo era posible?

¿Quizá se manifestaba en rayos X una mancha particularmente luminosa sobre la superficie de RXJ185? Era posible, ya que las estrellas de neutrones poseen a veces casquetes polares calientes. XMM-Newton pudo observarlos en 2005, en tres pulsares. Deben de producirse porque en los polos magnéticos, sobre la superficie de la estrella, se acumula mucha materia, que allí se calienta. Se asemejaría a la formación de las auroras polares terrestres, en las que partículas cargadas vuelan hacia los polos a lo largo de las líneas del campo magnético y, al chocar con la atmósfera, la excitan luminosamente. Otros astrofísicos creen que el calor fluye desde el interior de la estrella de neutrones hacia fuera, preferentemente a lo largo de líneas del campo magnético, y calienta desde dentro los casquetes polares.

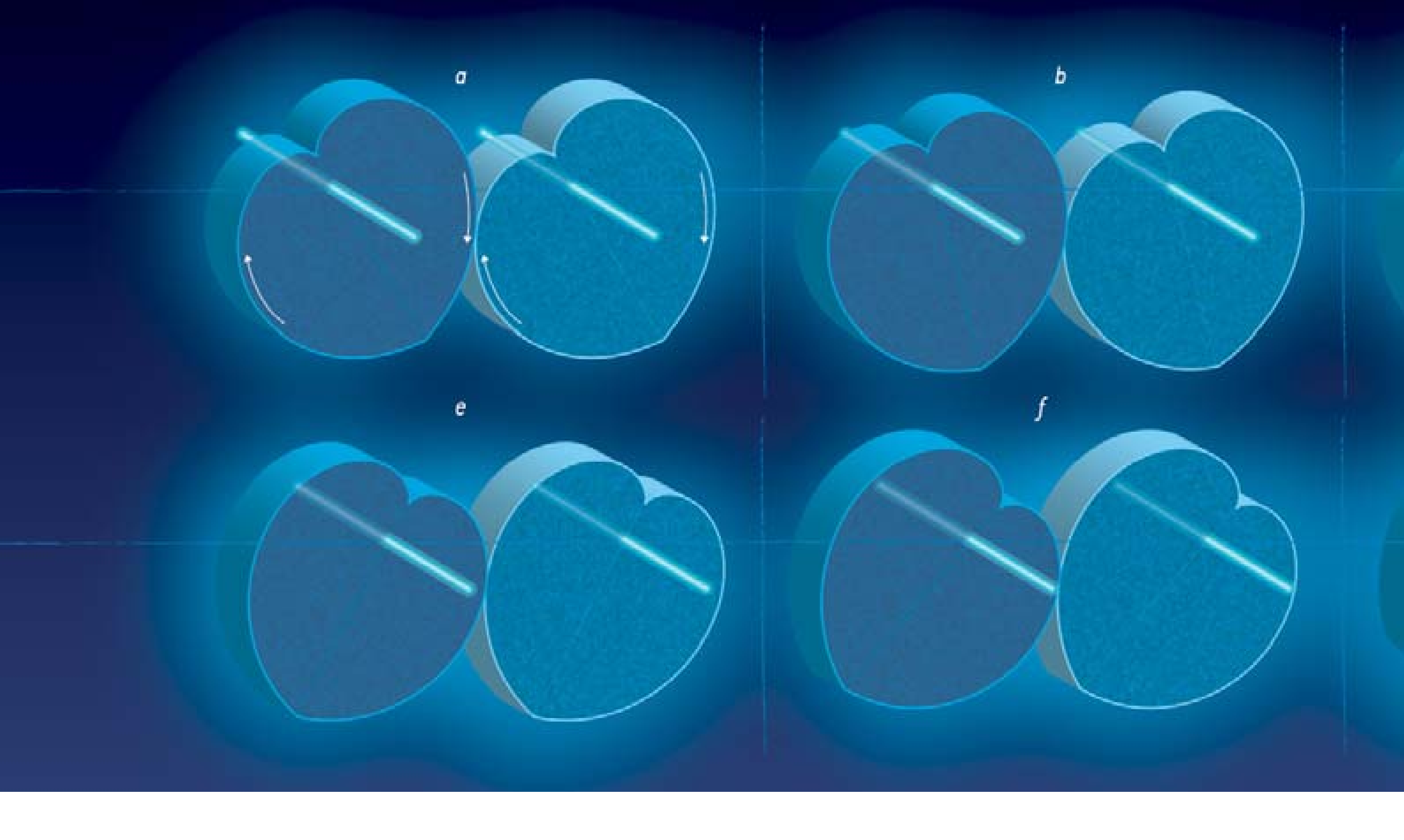
Si la luz visible de RXJ1856 procede de toda la estrella y los rayos X, por el contrario, sólo de los casquetes polares, la estrella deberá gozar de un diámetro de más de nueve kilómetros, si queremos dar razón de la cantidad de radiación observada. A ello hay que añadir que las nuevas mediciones arrojan una distancia algo mayor de la estrella, de cerca de 450 años luz, lo que nos obliga a corregir el diámetro hacia arriba. En resumidas cuentas, las medidas indican ahora que RXJ1856 mide unos 34 kilómetros. Un objeto de estas dimensiones puede ser una estrella de neutrones; la explicación de su luminosidad no exige ninguna materia quark exótica.

¿Podremos encontrar algún día una estrella de quarks? Tendremos en primer lugar que descubrir más cadáveres estelares y analizar con exactitud sus espectros. Para ello podrían ayudar el satélite eRosita, que será lanzado en 2009, y el proyecto Xeus de la Agencia Espacial Europea, del cual hasta ahora sólo hay planes. Xeus, muy ambicioso, constaría de dos satélites que volarían por el espacio con una distancia entre sí constante. La parte anterior serviría de lente para rayos X, la parte posterior, de cámara. La misión podría comenzar en el 2015.

Además necesitamos mediciones más exactas de las distancias de estrellas de neutrones, tal vez con el sucesor del telescopio espacial Hubble. Y precisamos un conocimiento mejor de las superficies de las estrellas de neutrones con campos magnéticos muy fuertes, para interpretar mejor los espectros obtenidos. Terminaremos por descubrir una estrella de quarks, siempre que existan.

El autor

Markus Thomas es científico jefe de proyectos del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre, en Garching. Está a cargo de experimentos de plasma de la Estación Espacial Internacional.



Engranajes paradójicos

Gracias a la curva que traza la punta de un hilo a medida que lo desenrollamos del carrete, podemos realizar unos curiosos mecanismos: engranajes en los que dos ruedas dentadas en contacto giran en el mismo sentido

Jean Lefort

Cuando se habla de engranajes casi siempre se piensa en dos ruedas dentadas que entran en contacto por sus partes exteriores de tal modo que una de ellas, cuyos dientes se imbrican en los de la otra, arrastra a ésta con su giro y le imprime una rotación de sentido contrario. Hasta fecha reciente, todos los engranajes de contacto exterior presentaban dicha propiedad, a saber, que los sentidos de rotación de las ruedas eran contrarios. Para lograr que dos ruedas dentadas girasen en el mismo sentido era necesario intercalar entre ellas una tercera rueda exterior intermedia, utilizar un montaje satélite para que una de las ruedas se encontrase por dentro de la otra o, por último, conectarlas mediante una correa recta (no cruzada).

Hace ya bastantes años, un ingeniero de Renault, Jacques Mercier, patentó un ingenioso sistema que le choca a la intuición: un engranaje de dos ruedas en contacto exterior las cuales giran en el mismo sentido. ¿En qué se funda este engranaje, calificado de paradójico? ¿Para qué podría servir? Lo descubriremos aquí.

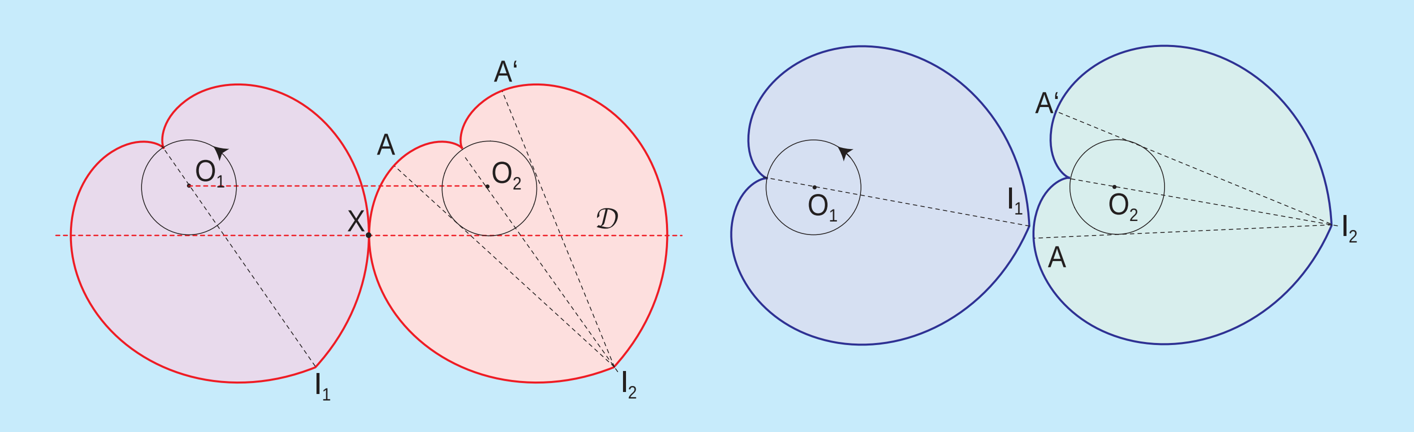
Los engranajes paradójicos se fundan en una curva llamada evolvente del círculo. Disponiendo de dos ruedas idénticas cuyo perfil sea la evolvente de un círculo se obtiene, situándolas de forma conveniente, un engranaje parcialmente paradójico (*véase la figura 1*); decimos

1. EN ESTA SECUENCIA DE IMAGENES, la rueda de la derecha gira en el sentido de las agujas de un reloj y arrastra a la rueda de la izquierda en el mismo sentido de rotación: es un engranaje paradójico. Pero con ruedas como éstas, que tienen un solo diente, el engranaje solamente funciona un poco más de un tercio de vuelta. A partir de ese momento se desenganchan.

parcialmente porque sólo funciona durante una fracción de vuelta.

La evolvente del círculo es una curva conocida hace siglos. Ocupa una posición privilegiada cuando se trata de engranajes, pues su forma geométrica es tal, que los rozamientos entre dos dientes de un engranaje clásico quedan minimizados si el perfil de cada diente corresponde a un arco de evolvente de un círculo.

¿De qué curva se trata? Tomemos una bobina de hilo, sujetémosla por su base a una mesa y vayamos desenrollando el hilo, manteniéndolo tenso. La punta de un lápiz atado al extremo del hilo que estamos desenrollando



2. EL PUNTO DE CONTACTO X de las dos ruedas se encuentra sobre la recta $\mathcal{D}$, tangente a los círculos generadores y paralela a la recta O_1O_2 (*diagrama de la izquierda*). En el curso del movimiento, el punto X permanece, pues, sobre esta misma recta $\mathcal{D}$. Si la rueda 1 gira en sentido positivo (o antihorario), la distancia O_1X aumenta, y por ser constante la distancia O_1O_2, la distancia O_2X tiene que disminuir. Por consiguiente, la rueda 2 tiene que girar en el mismo sentido que la rueda 1. El arrastre está asegurado hasta que el punto A llega a X; rebasada esta posición deja de existir contacto (*diagrama de la derecha*).

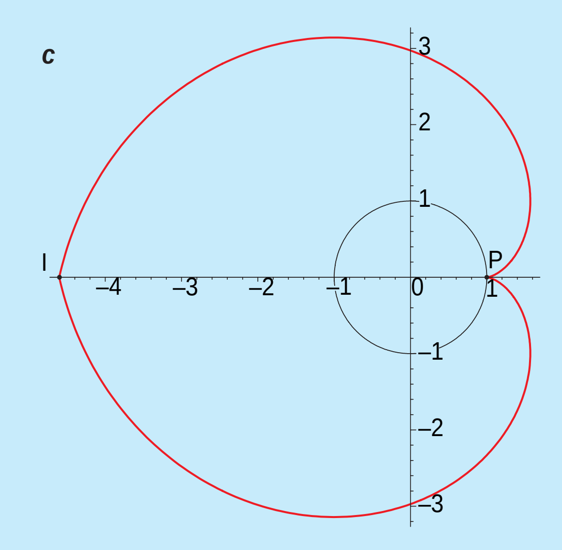
LA EVOLVENTE DEL CIRCULO

Fijada sobre la mesa una bobina de hilo, desenrollémoslo manteniendo el hilo tirante mientras gira alrededor de la bobina. Vista en planta, la bobina se corresponde con un círculo (*a*). La extremidad del hilo está representada por el punto M; el hilo se separa de la bobina en el punto T. Al desenrollarse, el hilo, tenso, es siempre tangente a la bobina. Por consiguiente, si desenrollamos una vuelta, la longitud del hilo será igual a $2\pi R$, siendo R el radio de la bobina (para simplificar hemos tomado aquí $R = 1$). Y si el hilo ha sido desenrollado un ángulo de t radianes, su longitud medirá Rt. Al expresar mediante coordenadas cartesianas que el vector $\overrightarrow{OM}$ es la suma del vector $\overrightarrow{OT}$ y del vector $\overrightarrow{TM}$, vemos que las coordenadas (x,y) del punto M admiten la expresión $x = R \cos t + R t \operatorname{sen} t$, $y = R \operatorname{sen} t - R t \cos t$. Estas dos fórmulas constituyen una representación paramétrica de la curva, donde t, el ángulo desenrollado, es el parámetro.

La imagen de la bobina es concreta, pero no permite comprender lo que ocurre para valores negativos de t. Al sustituir en la representación paramétrica el valor t por el $-t$, se obtienen los puntos simétricos respecto del eje de abscisas (*b*).

La evolvente del círculo corta al eje de abscisas en muchos puntos. Para determinarlos es suficiente resolver la ecuación $y = 0$; se deduce que estos puntos deben tener por parámetro t un valor tal, que $t = \tan t$. Un primer valor posible es $t = 0$, que corresponde a un punto de retroceso, a saber (1,0). El segundo valor, al que denotaré t_0, se aproxima a 4,493 radianes. El punto correspondiente de la curva, denotado I en el esquema *c*, tiene una abscisa próxima a –5. Los demás valores de t correspondientes a puntos situados sobre el eje de abscisas toman valores que se aproximan a $(k + 1/2)\pi$, aunque manteniéndose inferiores (siendo k un entero cualquiera).

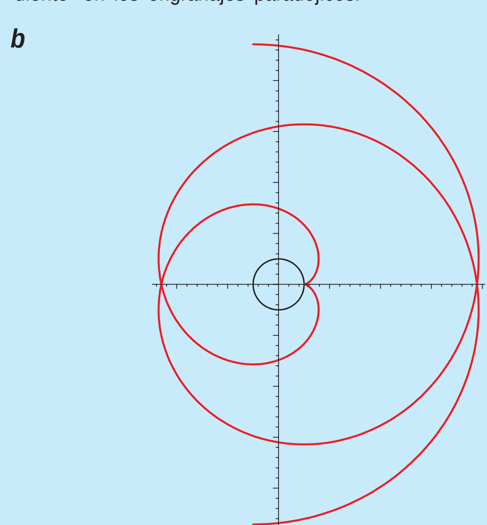
Si nos limitamos a valores del parámetro comprendidos entre t_0 y $-t_0$ se obtendrá una curva cerrada (*c*) con el aspecto de un corazón que tuviera la punta en I y el punto de retroceso en P, de coordenadas (1,0). Esta curva es la que hace el oficio de "diente" en los engranajes paradójicos.

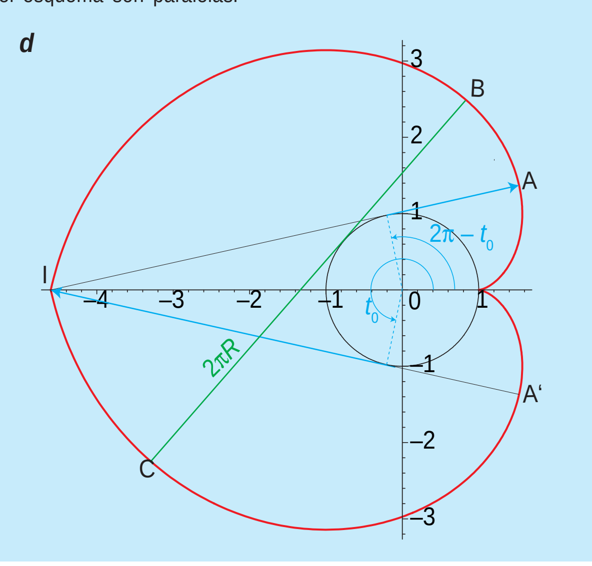


Una propiedad geométrica interesante de la curva cerrada construida con la evolvente del círculo es la siguiente: si se traza una tangente al círculo generador (el círculo que representa la bobina), el segmento definido por los dos puntos de intersección B y C con la curva tiene longitud $2\pi R$ (*véase el esquema d*). Así será cualquiera que sea la tangente, con tal de que los puntos B y C pertenezcan cada uno a una distinta mitad (simétrica) del "diente". Las posiciones extremas son, por lo tanto, las de los segmentos AI e IA'.

El lector podrá demostrar la propiedad reseñada si advierte que, si se consideran dos valores del parámetro t cuya diferencia sea 2π, en el símil de la bobina ello corresponde a desenrollar el hilo una vuelta más; por consiguiente, la parte desenrollada del hilo se habrá alargado en $2\pi R$ y habrá permanecido tangente a la bobina en el mismo punto. Podemos ratificarlo mediante el cálculo.

Otra propiedad notable de la evolvente del círculo: en todo punto M de la curva, la tangente en M (la recta trazada como una línea de puntos en el esquema *a*) es perpendicular a la recta TM. Esto se demuestra observando que el punto T es el centro instantáneo de rotación; y se demuestra además calculando, por derivación de las fórmulas de la representación paramétrica, la pendiente de la tangente. Se deduce que la tangente en M es paralela a la tangente en M', el punto diametralmente opuesto de la recta MT. Por ejemplo, las tangentes en los puntos B y C del esquema son paralelas.





POUR LA SCIENCE

trazará la mitad de la evolvente (*véase el recuadro* “La evolvente del círculo”). Al tomar sólo los dos primeros arcos de la evolvente completa del círculo, simétricos uno respecto del otro, se obtiene una curva cerrada cuya forma recuerda a un corazón. Esta porción de la evolvente de un círculo constituye el perfil de los dientes de los engranajes paradójicos.

La potencia de la geometría

¿Por qué dos ruedas que tengan esta forma, que hará el papel de “diente”, pueden engranarse de forma paradójica? Para comprenderlo, lo más sencillo es adoptar el punto de vista geométrico (en lugar del mecánico, que exigiría efectuar un balance de las fuerzas y pares mecánicos que se ejercen.)

Examinemos la situación en la que dos placas idénticas tienen libertad para girar alrededor de sendos ejes verticales que pasan por O_1 en una de ellas y por O_2 en la otra, siendo O_1 y O_2 los centros de las circunferencias generatrices de cada evolvente. Orientemos las placas de igual manera y acerquémoslas hasta que se hallen en contacto (*véase la figura 2*).

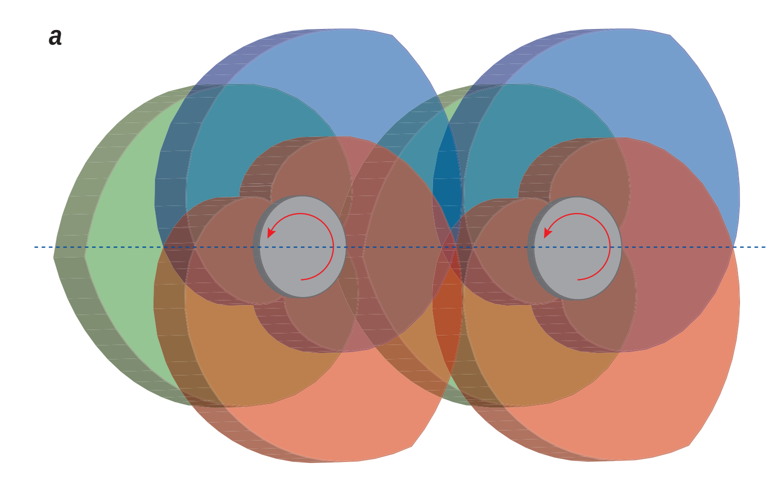
Una de las propiedades de la evolvente de un círculo es que su tangente en un punto X es perpendicular a la tangente al círculo generador que pasa por X (*véase el recuadro*). Se deduce de esta propiedad que el punto X de contacto de los dos dientes se halla sobre la tangente común a los círculos de base, que será paralela a la recta que une los centros de los dos círculos (*véase la figura 2*).

Durante el giro de las ruedas, el punto X se desplaza, pues, paralelamente a la recta O_1O_2. Si el diente 1 es el diente impulsor (es decir, el que induce el movimiento) y si gira en el sentido positivo o “antihorario” como se indica, la longitud O_1X aumentará. Al ser invariable la distancia O_1O_2 que separa los dos ejes de rotación, el giro del diente 1 obligará a la distancia O_2X a disminuir, lo que sólo puede ocurrir si el diente 2 gira también en sentido positivo. De aquí el carácter paradójico del engranaje compuesto por estas dos ruedas.

En semejante situación, el movimiento de las ruedas consiste en un deslizamiento de una sobre otra: en el punto X, las dos superficies se encuentran en desplazamiento relativo. Desde el punto de vista mecánico, tal hecho se traduce en un gran rozamiento. Mas, para la aplicación que Mercier había imaginado, ello constituía una ventaja (volveré sobre este punto). La evolvente del círculo es, en consecuencia, una curva doblemente paradójica, pues no sólo permite hacer girar de forma inusitada dos ruedas en contacto, sino que también da lugar en este caso a rozamientos considerables, mientras que en los engranajes clásicos lo que se busca es minimizarlos.

No obstante, se presenta un problema. Cuando la punta del diente 1 (es decir, el punto I_1) llega a X, se encuentra en contacto con el punto A del diente 2. Pero un instante después, ¡ya no existe contacto entre los dientes! El movimiento deja de ser transmitido. Si imaginamos que el diente 2 continúa girando con la misma velocidad angular que el diente 1, los dos dientes volverán a entrar en contacto en A’, pero entonces la longitud O_1X disminuirá, mientras que la longitud O_2X aumentará. Para que el movimiento continúe será necesario, en consecuencia, cambiar los papeles de los dientes (de impulsor a impulsado).

Por consiguiente, este dispositivo de dos ruedas, provistas cada una de un solo diente, garantiza la rotación durante algo más de un tercio de vuelta, o más exactamente, durante un ángulo igual a $(2t_0 - 2\pi)$ radianes, valor próximo a 2,703 radianes (un tercio de vuelta vale aproximadamente 2,094 radianes; sobre el significado de t_0, véase el recuadro “La evolvente del círculo”).



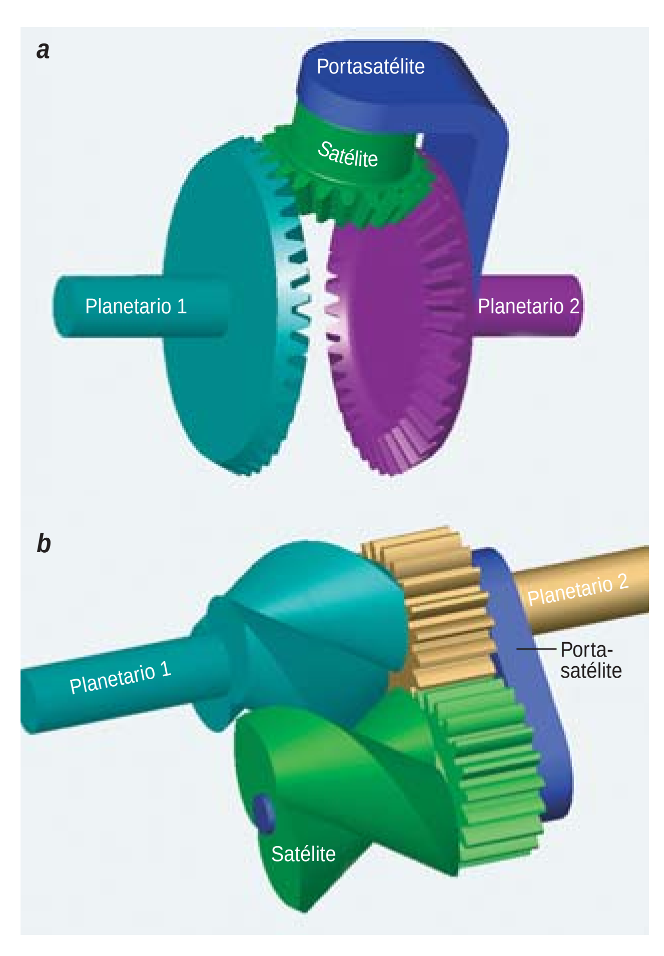


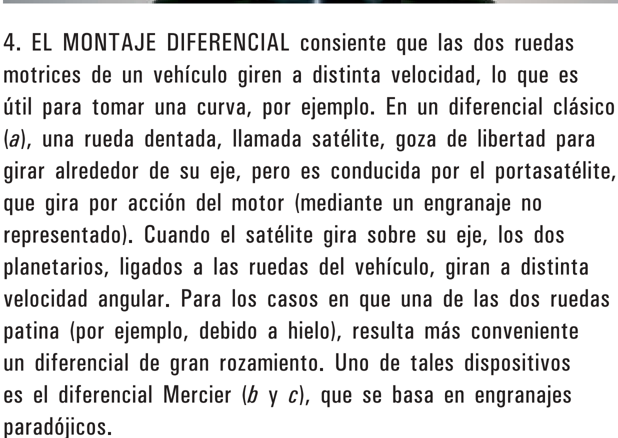


3. PARA ASEGURAR LA CONTINUIDAD del movimiento se pueden utilizar ruedas de tres dientes, superpuestas y desfasadas un tercio de vuelta (*a*). Apilando más ruedas de tres dientes se logra que el movimiento sea más regular. Por esta razón, en (*b*) cada rueda está compuesta por diez discos desfasados una décima de vuelta; la rueda de la izquierda y la central componen un engranaje paradójico, mientras que la rueda central y la rueda derecha constituyen un engranaje normal (por ser diferente la orientación relativa de los dientes). El apilamiento de una infinidad de discos infinitamente finos equivale a la construcción de una rueda helicoidal (*c*).

JACQUES MAUREL (*b y c*)/*Pour la Science*







4. EL MONTAJE DIFERENCIAL consiente que las dos ruedas motrices de un vehículo giren a distinta velocidad, lo que es útil para tomar una curva, por ejemplo. En un diferencial clásico (*a*), una rueda dentada, llamada satélite, goza de libertad para girar alrededor de su eje, pero es conducida por el portasatélite, que gira por acción del motor (mediante un engranaje no representado). Cuando el satélite gira sobre su eje, los dos planetarios, ligados a las ruedas del vehículo, giran a distinta velocidad angular. Para los casos en que una de las dos ruedas patina (por ejemplo, debido a hielo), resulta más conveniente un diferencial de gran rozamiento. Uno de tales dispositivos es el diferencial Mercier (*b* y *c*), que se basa en engranajes paradójicos.

RENAULT COMMUNICATION (c), JACQUES MAUREL (a y b)/*Pour la Science*

Para lograr un arrastre ininterrumpido se pueden situar tres dientes sobre la misma rueda, con dientes desfasados un tercio de vuelta entre sí. De este modo, habrá siempre un diente que vuelva a impulsar al correspondiente de la otra rueda. Lo mejor no es situar los dientes en un mismo plano, como se haría en una rueda dentada normal, sino unos debajo de otros (*véase la figura 3a*).

Como es fácil imaginar, las sacudidas del movimiento de tal dispositivo serían demasiado bruscas para que las aceptasen los mecánicos. Se puede mejorar la regularidad aumentando el número de ruedas superpuestas. Jacques Maurel, profesor de mecánica de un liceo tecnológico de Vitrolles, junto a Aix-en-Provence, ha construido un engranaje paradójico en el que cada rueda está compuesta por diez discos apilados, cada uno de tres dientes, y desfasados una décima de vuelta con respecto al siguiente (*véase la figura 3b*).

En la ejecución práctica, resulta preferible tener una “dentadura” helicoidal, que equivaldría a superponer una infinidad de ruedas planas muy finas cuya orientación variase progresivamente a lo largo del eje de la hélice. Se han realizado modelos de engranajes paradójicos helicoidales en materia plástica, sobre todo por Maurel (*véase la figura 3c*).

Por razones geométricas, el máximo son cuatro dientes (pues con mayor número los dientes chocarían unos contra otros). Desde el punto de vista mecánico, un buen compromiso se logra con dos dientes y un montaje helicoidal. Tal es el caso de los engranajes paradójicos con que el ingeniero Mercier construyó su diferencial.

Hasta ahora nos hemos referido sólo a engranajes cuyas ruedas constan del mismo número de dientes, lo que hace que estos últimos giren con la misma velocidad angular. El principio del helicoide permite que las ruedas de engranaje consten de distinto número de dientes y obtener, así, relaciones de velocidad angular distintas de 1. Si engranamos una rueda de dos dientes con otra de tres, dispondremos de una relación de 2/3, o de 3/2, según la elección de rueda impulsora.

Este invento ha encontrado aplicación en las diferenciales de los automóviles. Los montajes diferenciales son sistemas que permiten que las ruedas motrices de un vehículo giren con distinta velocidad angular, cosa

indispensable sobre todo al describir una curva, pues la rueda derecha no recorre la misma distancia que la izquierda.

Una aplicación a las diferenciales de los automóviles

Esquemáticamente, un diferencial clásico comporta dos planetarios —los piñones que transmiten el movimiento a cada una de las dos ruedas— conectados por una rueda dentada denominada satélite (*véase la figura 4a*). El satélite tiene libertad para girar alrededor de su eje, pero este eje está fijo a un portasatélite que gira alrededor de uno de los dos planetarios, arrastrado por el motor. En la situación en que el satélite no gira alrededor de su propio eje, los dos planetarios desarrollan el mismo movimiento, es decir, la misma velocidad angular.

Supongamos que el vehículo deba tomar una curva a la izquierda. En este caso, la rueda derecha deberá girar ligeramente más deprisa que la izquierda; el planetario al que está ligada la rueda derecha girará un poco más rápidamente y el satélite se pondrá a girar, lo que compensará la diferencia de velocidad entre los dos planetarios. Ello se consigue automáticamente merced al rozamiento de las ruedas contra el suelo.

Supongamos ahora que la rueda derecha se encuentra sobre un revestimiento que suprime casi completamente el rozamiento (debido a hielo, barro, etc.) mientras que la rueda izquierda conserva buena adherencia. Se demuestra en este caso que el par suministrado por el motor es transmitido por el diferencial casi exclusivamente a la rueda que patina; deja de estar asegurado que se imparta el movimiento deseado.

Se han propuesto numerosas soluciones, tanto mecánicas como electrónicas, para remediar el problema. Las mejores soluciones puramente mecánicas recurren a sistemas de "transferencia de par". La idea consiste en utilizar en el diferencial engranajes que tengan mal rendimiento, es decir, engranajes con un gran rozamiento, de modo que parte del par motor sea transferido hacia la rueda que no patina. Tal sistema, obviamente, no ha de funcionar de forma continua, porque el desgaste de las piezas sería excesivo.

El más conocido y utilizado de estos diferenciales de transferencia de carga es el diferencial Torsen, en el que el rozamiento es aumentado mediante engranajes "zurdos" (engranajes cuyos ejes son perpendiculares). Sin embargo, su cinemática es bastante complicada. El engranaje paradójico permite construir un diferencial de transferencia de par con una cinemática relativamente simple (*véanse las figuras 4a y 4c*).

Esa es la ventaja del diferencial Mercier, puesto a punto por Renault en 1988. Este mecanismo fue incluso integrado en el *Racoon*, un prototipo de vehículo de turismo todoterreno y anfibio presentado por dicho constructor de automóviles. Pero las piezas necesarias para los diferenciales basados en engranajes paradójicos son más delicadas y más costosas de mecanizar que las de los engranajes ordinarios. Con el paso de los años los progresos de la electrónica han aportado otras soluciones. A pesar de ello, los engranajes paradójicos no dejan de ser una idea muy elegante.

El autor

Jean Lefort es profesor de matemáticas en el liceo Blaise Pascal de Colmar.
Agradecemos a Jacques Maurel y a Michel Weckner su ayuda en la preparación de este artículo.

Bibliografía complementaria

ENGRENAGES-CONCEPTION, FABRICATION, MISE EN OEUVRE. G. Henrot. Dunod (7ª edición), 1999.

GRINCEMENT DE DENTS. VOYAGE MÉCANIQUE AUTOUR DU PROFIL EN DÉVELOPPANTE DE CERCLE. J. Maurel en *Technologies & Formations*, n.º 105, págs. 10-15, 2002.

PARADOXICAL GEAR CHALLENGE. J. Maurel en *Model Engineer*, del n.º 4235 al n.º 4241, noviembre de 2004 a marzo de 2005.

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

La memoria magnética de las piedras

Al enfriarse, ciertos materiales conservan la memoria del campo magnético ambiente, información que permite, por ejemplo, datar las lavas terrestres

Los arqueólogos leen la memoria magnética de ladrillos cocidos hace milenios y los geólogos descifran las pistas dejadas por el campo magnético terrestre en lavas de millones de años de edad. La física del registro magnético nos explica tanto la excepcional longevidad de esas memorias de piedra como la de actuales memorias magnetoópticas.

Para efectuar una grabación magnética, se necesita un material capaz de imantarse duradera y establemente. Se trata de materiales muy raros aunque, a escala microscópica, las circunstancias parezcan propicias a la magnetización. De por sí, cada electrón es una minúscula brújula; por otra parte, gira alrededor del núcleo del átomo y crea una corriente cerrada y análoga a la de un imán. Pero, en la mayoría de los cuerpos, los imanes elementales de una molécula dada se compensan exactamente en virtud del principio de Pauli: por cada electrón que gira en un sentido hay otro electrón que gira en el sentido contrario. Así, el agua, lo mismo que el vidrio o la madera, son casi insensibles a la presencia de los campos magnéticos.

Sólo algunos cuerpos, como el aluminio o el oxígeno, se magnetizan a escala microscópica: son cuerpos paramagnéticos. Esas sustancias se magnetizan ligeramente bajo la acción de un campo magnético intenso, pues éste orienta en la misma dirección las brújulas moleculares tal como orienta, a nuestra escala, las agujas imantadas. La suma de esos pequeños imanes crea entonces una imantación macroscópica, según la dirección del campo. Sin embargo, esa imantación desaparece cuando se suprime el campo magnético, pues la agitación térmica produce unas colisiones que no tardan en volver a orientar al azar los imanes microscópicos.

El campo coercitivo

Por suerte para la grabación magnética, hay excepciones, como los óxidos de hierro. Dotados de magnetización a escala microscópica, esos óxidos poseen una propiedad adicional: las interacciones electrostáticas entre los electrones de átomos vecinos en la estructura cristalina son tan fuertes que, pese a la agitación térmica, alinean los imanes elementales en una dirección común. Los óxidos de hierro comparten esa propiedad con otras sustancias, como los aceros o las aleaciones de níquel. En su seno, la alineación de los imanes elementales se establece poco a poco a la escala de un grano cristalino.

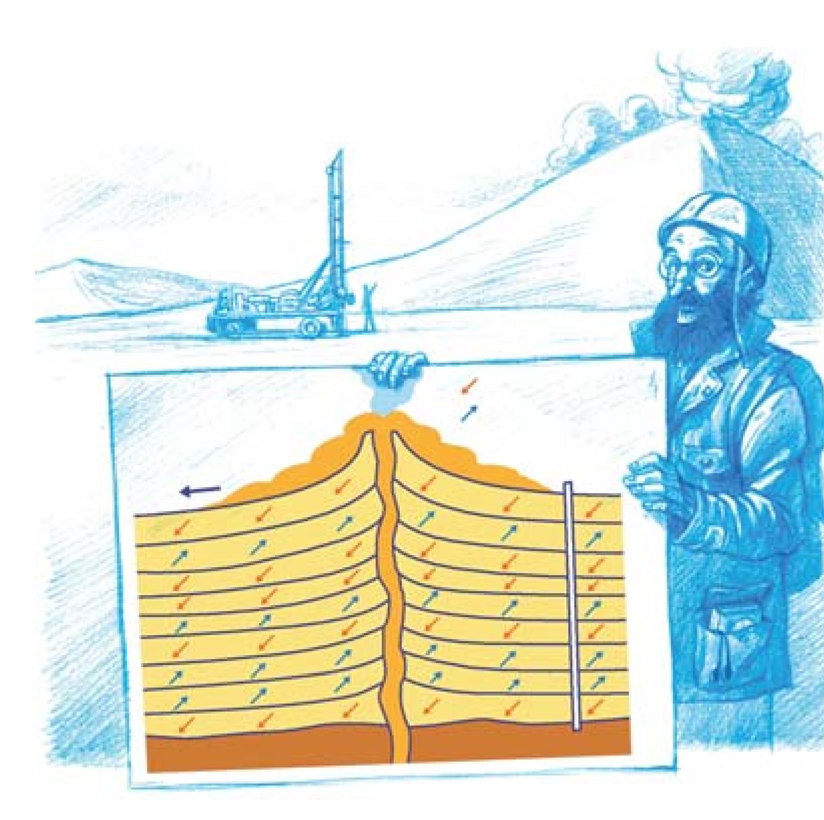


1. Durante el registro, se aplica un campo magnético a un soporte de grabación que contiene un granulado ferromagnético. En una memoria magnetoóptica, el campo magnético creado por el cabezal de escritura no puede cambiar él solo la magnetización del soporte (*a*). Cuando éste se encuentra caliente, la agitación térmica vence a las interacciones entre los imanes elementales y el campo exterior crea una débil magnetización (*b*). Cuando la temperatura vuelve a bajar por debajo del punto de Curie, el soporte adquiere una fuerte magnetización en la dirección del campo magnético (*c*).

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO

Para dejar registrada una información en uno de esos materiales ferromagnéticos, se le magnetiza situándolo en un campo intenso. Las imanaciones de todos los granos que lo componen basculan entonces en el sentido del campo; se consigue así una magnetización macroscópica persistente cuando se suprime el campo magnético. Esa "imanación remanente" es muy estable y poco sensible a las pequeñas perturbaciones magnéticas. Sólo un campo magnético intenso y de sentido opuesto la modifica. El campo coercitivo es el campo mínimo capaz de anular la magnetización de un cuerpo ferromagnético.

Los soportes de grabación magnéticos, como cintas, discos duros o disquetes, se componen de una fina capa de material ferromagnético depositado sobre un sustrato no magnético. Ese material ferromagnético tiene un campo coercitivo lo bastante débil como para que el campo magnético creado por el cabezal de escritura cambie su magnetización. La información registrada se lee merced a la corriente eléctrica inducida, en el cabezal de lectura, al pasar ante éste las zonas magnetizadas. Para conservar la magnetización, el material debe poseer un campo coercitivo de 0,1 tesla, mayor que el campo magnético terrestre (50 microtesla) y que los campos parásitos de los utensilios eléctricos usuales (una militesla para un secador de cabello).



2. El campo magnético terrestre imanta las lavas mientras se enfrían. Los geólogos han reconstruido su historia a lo largo de las edades midiendo la magnetización de las lavas antiguas y han establecido que se ha invertido cuatro veces a lo largo de los últimos cuatro millones de años.

El papel de la temperatura de Curie

Ciertas rocas contienen compuestos ferromagnéticos (los óxidos de hierro, magnetita o hematita) que se magnetizan bajo la acción de un campo magnético. Como su campo coercitivo es muy superior al campo magnético terrestre, éste no les afecta, salvo cuando la temperatura del material adquiere un valor alto. Sabemos, gracias a Pierre Curie (1859-1906), que el ferromagnetismo de un cuerpo disminuye al calentarlo, hasta desaparecer. Por encima de cierta temperatura —el punto de Curie—, la agitación térmica puede más que las interacciones entre átomos vecinos, de suerte que el material cambia a paramagnético, incapaz entonces de fijar la magnetización. Los puntos de Curie de la magnetita y de la hematita son, respectivamente, 575 ºC y 675 ºC, que son temperaturas altas, pero inferiores a las de fusión de esos cuerpos.

Así, cuando la roca de una corriente de lava empieza a solidificarse, los granitos de magnetita que contiene son paramagnéticos. El campo magnético terrestre les confiere una pequeña magnetización común, la cual, una vez que la temperatura baja por debajo del punto de Curie, ceba y dirige el crecimiento y la alineación de las imantaciones de cada grano. Cuando llega a la temperatura ambiente, la lava cargada de magnetita está dotada de una magnetización fuerte y estable. De ese modo, conserva la impronta del campo magnético reinante cuando se formó.

En esa información se basan los geofísicos para seguir la evolución del campo magnético terrestre, así como los desplazamientos de los polos magnéticos durante los últimos cuatro millones años. Han puesto de manifiesto numerosas inversiones de los polos durante ese período. Miden también de ese modo la velocidad de creación del suelo oceánico a una y otra parte de las dorsales por donde sube la lava salida del manto.

Cuando la temperatura de una de esas rocas se lleva por encima de la temperatura de Curie, su magnetización desaparece y en ella se inscribe una nueva información (o sea, una nueva magnetización). Eso es lo que ocurre con los granos de magnetita que se hallan en los ladrillos o las cerámicas. Esos ladrillos transmiten la memoria del campo magnético que reinaba cuando se cocieron. Ahora bien, puesto que se conoce la evolución del campo magnético terrestre durante los dos últimos milenios, podemos datar objetos por arqueomagnetismo.

Ese modo de registro se encuentra hoy en un tipo de memoria disponible desde que pueden conseguirse aleaciones de terbio, cobalto y ferrita, cuyas temperaturas de Curie son moderadamente bajas (en torno a 200 ºC) con un campo coercitivo fuerte a temperatura ambiente. En esas memorias "magnetoópticas", un haz láser de poca potencia (algunos miliwatt) calienta el soporte de grabación por encima de la temperatura de Curie. Basta entonces un campo magnético débil para magnetizar la zona calentada y las dimensiones de la zona magnetizada ya no son las del electroimán que escribe, sino las del haz del láser, mucho menor. Ello explica la enorme capacidad de almacenamiento de las memorias magnetoópticas. Sin embargo, sólo los arqueólogos del futuro podrán decir si los soportes de marras tendrán una memoria tan longeva como las rocas volcánicas.

Juan M.R. Parrondo

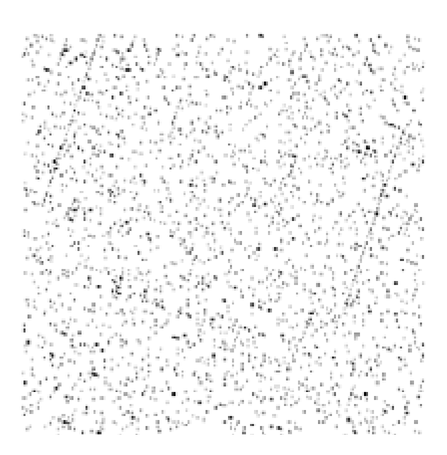
Más sobre números aleatorios

Le propongo un reto aparentemente sencillo: ¿podría "imitar" el comportamiento de una moneda o de un dado? Chris Wetzel, del Rhodes College, en los EE.UU., creó una curiosa página web (http://www.rhodes.edu/Psych/wetzel/random/intro.html), en la que se puede comprobar lo difícil que es comportarse de forma puramente aleatoria. Se introduce en un casillero una serie "imaginaria" de tiradas, que no es más que una secuencia de H y T (por cara, *head*, y cruz, *tail*). Se tienen que introducir 100 tiradas, para lo cual no se tarda más de un minuto, puesto que sólo hay que teclear las dos letras mencionadas de la forma más aleatoria posible.

La serie entonces se analiza mediante diversos *tests de aleatoriedad*. Una serie realmente aleatoria puede consistir en cualquier secuencia de resultados, pero si la cadena es muy larga debe poseer, con una alta probabilidad, ciertas propiedades. Por ejemplo, si la serie se obtiene lanzando una moneda no sesgada, el número de caras y el número de cruces deberían ser similares. En una serie de 100 tiradas, estos números deberían estar entre las 40 y las 60 tiradas. Pero hay otras propiedades menos evidentes.

En la página de Wetzel se realizan seis comprobaciones: 1) el número de caras; 2) el número de subsecuencias con el mismo resultado consecutivo; 3) el número mayor de caras o cruces consecutivos; 4) la probabilidad de que salga una cara habiendo salido una cara en el turno anterior; 5) la probabilidad de que salga una cara habiendo salido una cruz en el turno anterior; y 6) la diferencia entre las dos probabilidades anteriores. Con algunos conocimientos de probabilidad, se pueden calcular los valores medios de estas cantidades y el intervalo en que se encontrarán con un cierto nivel de confianza, por ejemplo, del 99 %. No les revelaré estos valores para que puedan hacer la prueba sin ningún conocimiento previo. Si la secuencia que usted ha tecleado da lugar a valores que están fuera de estos intervalos, habrá sido "descubierto" (aunque un 1 % de secuencias realmente aleatorias también fallará el test).

Con un poco de práctica, uno puede pasar todos estos tests, aunque cualquier pequeño detalle se traduce en alguna pauta que es detectada. Por ejemplo, es bastante difícil teclear una buena secuencia aleatoria con las dos manos o aun si se teclea H y T con dos dedos de una misma mano. En cualquiera de estos casos, surgen algunas asimetrías entre la H y la T. Incluso aunque el número de caras y cruces sea similar, los tres últimos tests, probabilidades de que a una cara le siga una cara o una cruz, son muy difíciles de superar.



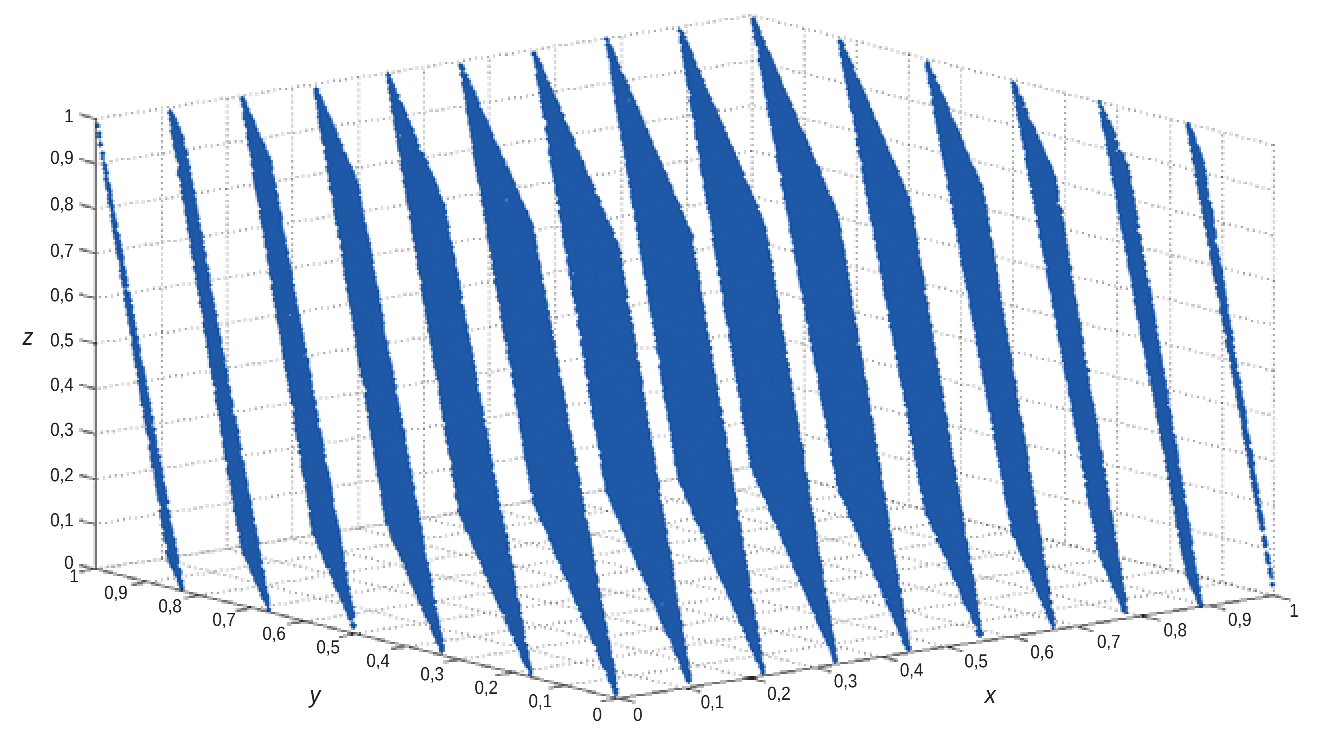
1. 5000 puntos en dos dimensiones generados por un algoritmo de congruencia lineal, con a = 1277, b = 131.072 y semilla I_n = 1, con 5000 puntos. Las dos líneas oblicuas no aparecerían en una secuencia realmente aleatoria.

Hay un sinfín de tests de aleatoriedad más complicados que los que utiliza Wetzel. ¿Por qué tanto interés en comprobar la aleatoriedad de una secuencia de números?

Como ya mencionamos el mes pasado, los números aleatorios son necesarios en muchas situaciones. La más obvia es la organización de un sorteo o una lotería. En criptografía cumplen un papel crucial, al servir de plantilla para codificar mensajes. En el mes de agosto vimos también que los protocolos de comunicación entre nuestros teléfonos móviles y las centralitas pueden ser más eficientes si disponemos de números aleatorios. Finalmente, en muchas simulaciones numéricas de todo tipo, reacciones químicas, fluidos, mercados financieros, climatología o reactores nucleares, es necesario utilizar una gran cantidad de números aleatorios, que en ocasiones sirven para reflejar la aleatoriedad ineludible de lo simulado y en otras para explorar de forma eficiente el conjunto de estados del sistema o los posibles valores de los parámetros que lo definen.

La aleatoriedad real en una serie de números, es decir, su absoluta impredecibilidad y la ausencia de cualquier pauta en los mismos, sólo es posible si esos números se obtienen de algún proceso natural. Se puede por supuesto lanzar una moneda y anotar el resultado, pero en la mayoría de las aplicaciones se necesita una gran cantidad de números aleatorios, que sólo pueden generarse mediante métodos automatizados. Hay algunas empresas que ofrecen listados de números genuinamente aleatorios, obtenidos a partir de fenómenos cuánticos, como las desintegraciones radiactivas, de ruido en dispositivos electrónicos o de datos climatológicos, como la temperatura o la humedad en un cierto lugar. En la página web *random.org* se ofrecen series de números aleatorios basados en este tipo de datos y hay también información interesante sobre la generación de números aleatorios.

Ni siquiera con estos métodos automatizados es posible generar la cantidad de números aleatorios necesaria para muchas simulaciones. Se recurre entonces a números *pseudoaleatorios*, como los que vimos el mes pasado. Son secuencias de números obtenidos mediante algoritmos completamente deterministas. Por tanto,



2. Diagrama tridimensional del IBM RANDU con 100.000 puntos (tomado de Wikipedia).

las secuencias son predecibles. Sin embargo, su comportamiento es muy parecido al de los números genuinamente aleatorios, y son capaces de pasar muchos de los tests de aleatoriedad. Algunos de ellos son además muy rápidos desde el punto de vista computacional, lo que los hace idóneos para muchas aplicaciones.

El mes pasado vimos un tipo de algoritmo que genera números pseudoaleatorios: los basados en desplazamientos de registros. Los teléfonos móviles utilizan constantemente uno de ellos para identificarse ante la base. Pero los generadores más extendidos, sobre todo en simulaciones numéricas, son los de *congruencia lineal*. La versión más simple consiste en la fórmula siguiente:

$$I_{n+1} = (a \times I_n) \bmod b$$

En esta fórmula a y b son números que caracterizan el algoritmo. La operación módulo, x mod b consiste en dividir x entre b y tomar el resto. I_n forma la secuencia de números aleatorios, que debido a la operación módulo, estarán entre 1 y $b - 1$ (el cero no es un valor deseable, porque, si en la secuencia aparece un cero, todos los valores siguientes serán también nulos). Si se desean números entre 0 y 1, basta dividir los I_n entre $b - 1$. Para comenzar la secuencia se escoge un valor inicial I_1, que suele llamarse *semilla*. Como la fórmula es completamente determinista, en cuanto vuelve a aparecer la semilla en la secuencia, los valores siguientes volverán a ser los mismos. En otras palabras, la secuencia es periódica y su período no puede ser mayor que $b - 1$. Lo interesante es entonces que b sea muy grande y que la secuencia tenga período máximo. Pero ni siquiera esto garantiza que la secuencia genere unos "buenos" números aleatorios.

Esta falta de calidad es en ocasiones difícil de detectar. Por ejemplo, con $a = 1277$, $b = 131.072$ y semilla $I_n = 1$, se obtiene una secuencia de período 32.769. No es de período máximo pero, hasta los 32.000 primeros números, pasa sin dificultad muchos de los tests de aleatoriedad. Sin embargo, si uno dibuja en el plano los pares de puntos (I_1,I_2), (I_3,I_4), etc., se encuentra con la figura 1, donde se han representado 5000 puntos. Las dos líneas oblicuas que aparecen en la gráfica indican una pauta que no estaría presente si la secuencia fuera genuinamente aleatoria.

Este tipo de representación gráfica de los números generados por el algoritmo es un buen test de aleatoriedad. Una representación similar en tres dimensiones de puntos con coordenadas (I_1,I_2,I_3), (I_4,I_5,I_6), ..., "desenmascaró" un algoritmo ampliamente usado en los años sesenta del siglo pasado para todo tipo de simulaciones, ya que estaba detrás de la función RANDU de los ordenadores de IBM. El RANDU utiliza $a = 65.539 = 2^{16} + 3$ y $b = 2^{31}$ y no muestra ninguna pauta en una representación bidimensional. Lo que se ve al hacerla es una nube de puntos uniformemente distribuida sobre el plano. Sin embargo, la representación tridimensional mostró lo que se puede contemplar en la figura 2. Todos los puntos se encuentran en 15 planos paralelos. De hecho, esta correlación tan significativa se puede demostrar de forma relativamente sencilla y es ahora sorprendente que nadie reparara en ella durante casi una década.

Semejante "fiasco" puso en duda muchos de los resultados de las simulaciones numéricas realizadas en los años sesenta y setenta y dio un toque de atención a los científicos. Pocos se fían ya de los generadores de números aleatorios que proporcionan los sistemas operativos o los lenguajes de programación comerciales y los diseñan ellos mismos o los obtienen de centros de investigación fiables.

IDEAS APLICADAS

Mark Fischetti

VIDEOS DE ALTA DEFINICION

Blu-ray frente a HD DVD

Los DVD dan una imagen más nítida que las videocintas, a las que han venido desplazando. Pero los estudios de cine tratan ahora de generar un nuevo mercado mediante la producción de un vídeo de definición aún mayor.

Los fabricantes de discos han lanzado a competir dos formatos de alta definición: Blu-ray y HD DVD. Se compara esa batalla con la que se libró a finales de los años setenta entre las videocintas VHS y Betamax. Pero la contienda actual podría acabar de otra manera: algunas marcas están fabricando máquinas aptas para ambos formatos; Warner Brothers anuncia que no tardará en lanzar filmes grabados por los dos procedimientos en discos de dos caras.

Según Aaron Dew, de LG Electronics USA, en Elglewood Cliffs, los consumidores dudan sobre si pasarse al mercado de la alta definición, a la espera de ver qué formato se impone. La competencia entre los dos formatos ha provocado la retracción del mercado. En febrero, LG empezó a despachar un reproductor que lee ambos formatos. Dicen los críticos que las máquinas híbridas podrían no ser las mejores para ninguno de los dos —o que serán más caras si llegan a comercializarse— y que los discos de dos caras costarán más porque los estudios tendrán que grabarlos dos veces.

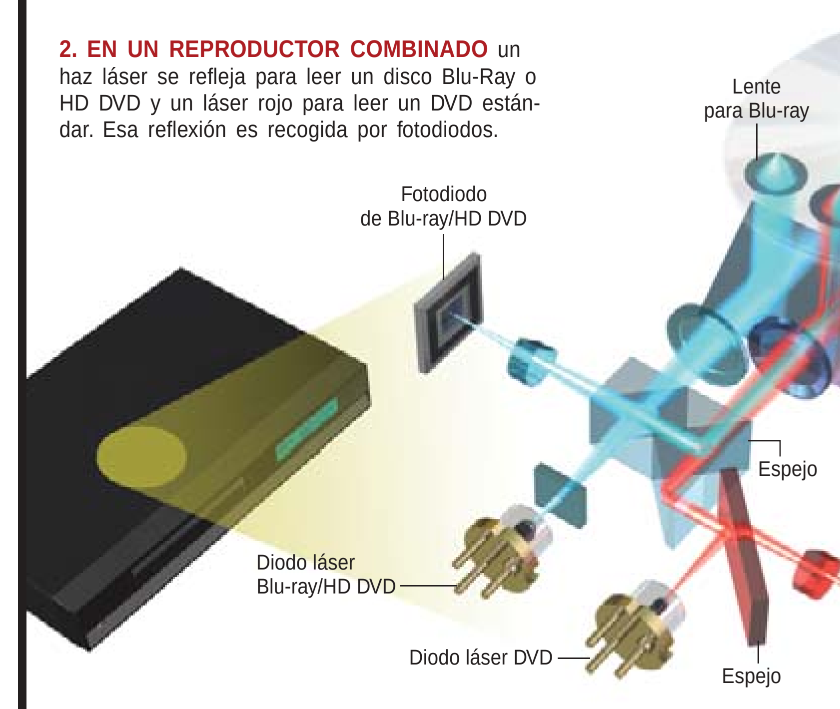
Blu-ray y HD DVD producen imágenes de la misma nitidez. La calidad de las imágenes comparada con la de los DVD normales, empero, no es tan espectacular como la mejora que supuso el DVD sobre la videocinta. Se bromea sobre si tan modesta ganancia compensa el precio de reproductores y discos.

Impertérritos, los dos bandos tratan ahora de destacarse en la carrera por la capacidad de almacenamiento. Un disco HD DVD admite 15 gigaoctetos; un Blu-ray, 25 gigaoctetos. Pero, como la mayoría de los HD DVD usan el procedimiento de compresión de datos MPEG-4 y no el MPEG-2 que aún se ve en los discos Blu-ray, ambos bastan para almacenar filmes completos más algún extra. Los fabricantes, además, han empezado a ofrecer los discos de capa doble, que doblan esas capacidades en una sola cara. Aunque las posibilidades permiten añadir aún más extras y audio avanzado, según Steve Wyatt, de GE Plastics, una empresa holandesa, se está produciendo una auténtica pugna por ver quién ofrece el disco de mayor capacidad. Algunos fabricantes incluso han desarrollado prototipos de discos de triple capa.

Los reproductores de combinación y los discos de dos caras sugieren que ambos formatos pueden coexistir. Si de la comodidad de minoristas y consumidores se tratara, un formato es mejor que dos.



1. EN UN DISCO BLU-RAY DE DOBLE CAPA la información almacenada en los dos niveles es leída por luz láser al reflejarse en ambas.



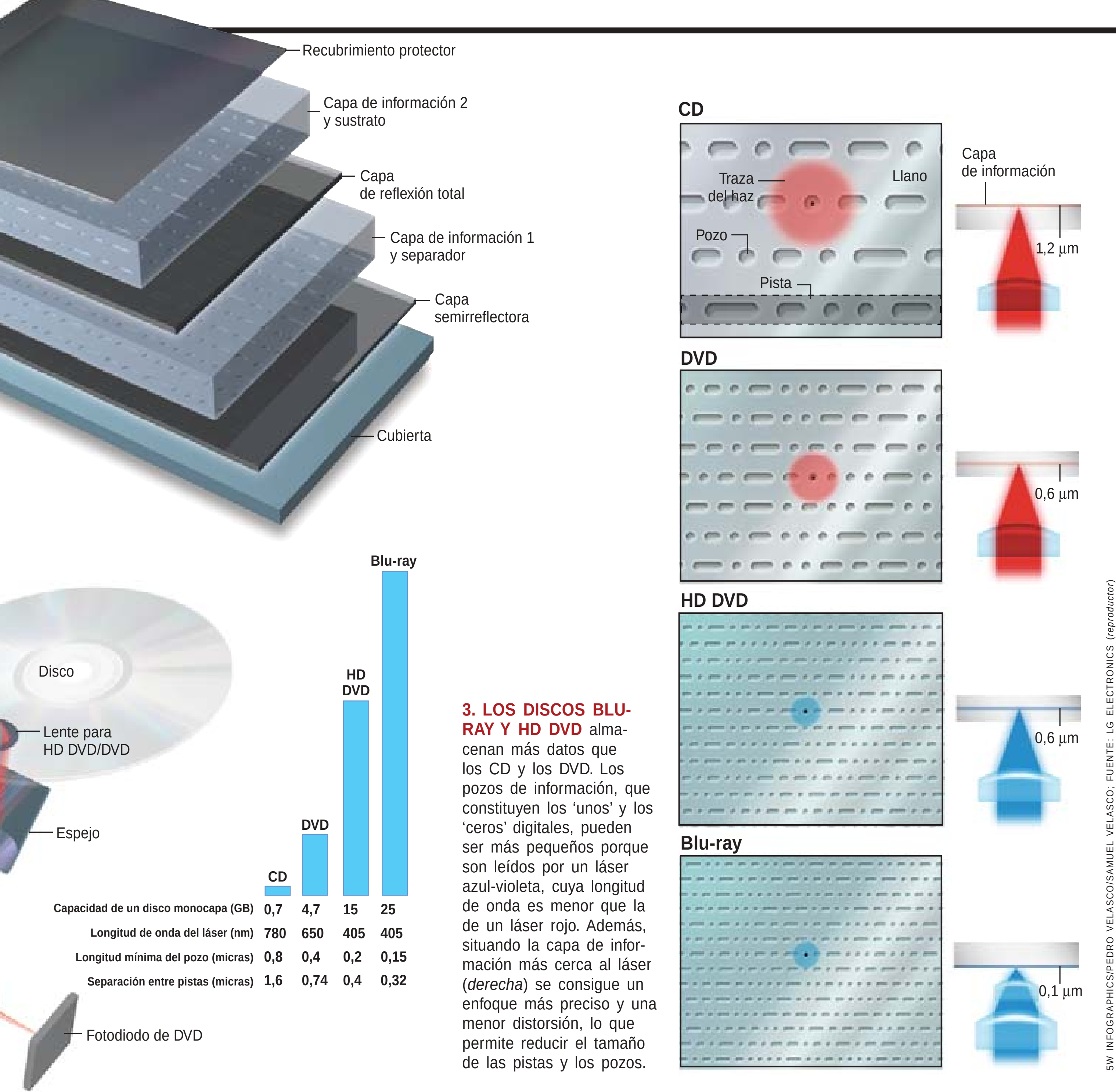
2. EN UN REPRODUCTOR COMBINADO un haz láser se refleja para leer un disco Blu-Ray o HD DVD y un láser rojo para leer un DVD estándar. Esa reflexión es recogida por fotodiodos.

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **PRECIOS PROGRESIVOS:** El Blu-ray y el HD DVD se ven a plena resolución sólo en pantallas digitales de alta definición. De éstas, las mejores poseen una resolución de 1080p: constan de 1080 hileras de píxeles y cada hilera se activa de forma progresiva (de ahí la "p"). Algo menos nítida es la resolución de 1080i, donde las filas se activan de forma alternada o entrelazada (de ahí la "i", del inglés "interlaced"). La salida de los reproductores Blu-ray corresponde por lo general a una señal de 1080p, mientras que algunos reproductores de HD DVD la dan de 1080i. Las señales de televisión de alta definición (HDTV) se emiten a 1080i o 720p. Por tanto, pagar una cantidad extra por una TV digital de 1080p no ofrece ventajas para los actuales usuarios de la HDTV, ni para muchos de los de HD DVD.

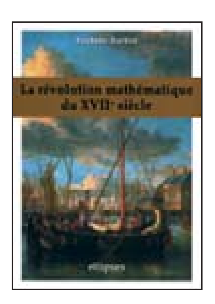
➤ **SOPA DE LETRAS:** Las abreviaturas de las variedades de CD y DVD se prestan a confusión, una confusión que se prolonga en los formatos de alta definición. Un disco Blu-ray se designa BD. Un disco BD-ROM sirve sólo para la reproducción de lo que tiene pregrabado. Un disco BD-R puede grabarse sólo una vez. Un BD-RE puede regrabarse muchas veces. Los homólogos de HD DVD competidores de Blu-ray son los discos HD DVD-ROM (pregrabados), los HD DVD-R (grabables una vez) y los HD DVD-RAM (de regrabación múltiple).

➤ **NO TIRE SUS DVD:** Para que los consumidores no tengan que amontonar dos máquinas o desechar sus viejos DVD, la industria ha desarrollado prototipos de discos y reproductores de alta definición retrocompatibles. Los discos contienen una capa añadida que almacena los datos de los DVD tradicionales, de forma que los reproductores leen ambos formatos.

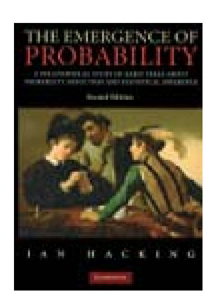


3. LOS DISCOS BLU-RAY Y HD DVD almacenan más datos que los CD y los DVD. Los pozos de información, que constituyen los 'unos' y los 'ceros' digitales, pueden ser más pequeños porque son leídos por un láser azul-violeta, cuya longitud de onda es menor que la de un láser rojo. Además, situando la capa de información más cerca al láser (*derecha*) se consigue un enfoque más preciso y una menor distorsión, lo que permite reducir el tamaño de las pistas y los pozos.

5W INFOGRAPHICS/PEDRO VELASCO/SAMUEL VELASCO; FUENTE: LG ELECTRONICS *(reproductor)*



LA RÉVOLUTION MATHÉMATIQUE DU XVII SIÈCLE
por Evelyne Barbin. Ellipses; París, 2006.



THE EMERGENCE OF PROBABILITY. A PHILOSOPHICAL STUDY OF EARLY IDEAS ABOUT PROBABILITY INDUCTION AND STATISTICAL INFERENCE
por Ian Hacking. Cambridge University Press; Cambridge, 2006.



PHILOSOPHIE NATURELLE ET GÉOMÉTRIE AU XVII^{e} SIÈCLE
por Vincent Jullien. Honoré Champion; París, 2006.

Matemática del siglo XVII

La geometría, motor de la revolución científica

La revolución científica del siglo XVII va asociada de forma inextricable al pensamiento mecanicista, la matematización de la naturaleza y la experimentación. Tres aspectos que tienen por trama vertebradora el desarrollo de una nueva matemática. Coincidiendo con el inicio de la centuria, la ciencia se propuso abandonar la especulación estéril por la búsqueda de soluciones de los problemas que planteaba el dominio de la naturaleza. El científico se espeja en la técnica a la hora de abordar la naturaleza. Lo que supone reemplazar la lógica aristotélica por el recurso de la matemática (*La révolution mathématique du XVII^{e} siècle*). Lejos de quedar confinadas en el dominio de la especulación, las matemáticas se hallan inscritas en la realidad del mundo, son la llave de la comprensión de la naturaleza y posibilitan la transformación de la creación al servicio del hombre. Ello requiere, a su vez, una profunda transformación de la matemática, de sus métodos, objetos y significados. Las curvas son las primeras en experimentar ese cambio. De hecho, la invención de la curva en los años finales del primer tercio del siglo XVII representa el rasgo distintivo de una revolución matemática protagonizada, entre otros, por Bacon, Descartes, Galileo, Roberval, Fermat, Pascal, Huygens, Leibniz y Newton (*Philosophie naturelle et géométrie au XVII^{e} siècle*). Con otras palabras, la revolución está ligada a la creación de la geometría cartesiana y del cálculo infinitesimal. *In medio temporis*, la teoría de la probabilidad (*The Emergence of Probability*).

La física deja de lado las explicaciones aristotélicas de los fenómenos por sus causas para abrazar un método cuantitativo de medición. "Cuanto más alejada se encuentra un cosa de su cuantificación —declaraba Kepler— tanto más obscura y expuesta al error sigue." Por eso, la matemática debe aprestarse a sustituir la lógica aristotélica en el estudio de la naturaleza. La lógica regía el orden de las proposiciones en la explicación causal de los fenómenos, mientras que la matemática tiene que determinar las relaciones normativas a las que han de ajustarse los efectos cuantificados y medidos. Y aquí entra la geometría. No pertenece al terreno de la especulación pura, sino que se infiere de los patrones de la naturaleza. Por citar de nuevo a Kepler, "Más que entregarme a las especulaciones de la geometría abstracta, he buscado la geometría allí donde se expresaba realmente, en los cuerpos del mundo".

El conocimiento científico es útil para las técnicas. Descartes consideraba que la invención de las gafas por Jacques Metius se debió al azar, a la experiencia y a la fortuna, pero su perfeccionamiento, subraya, depende de un método científico. En las *Règles pour la direction de l'esprit*, postula un progreso simultáneo de las ciencias y las técnicas: las técnicas permiten un mayor conocimiento de la naturaleza y las ciencias posibilitan el refinamiento de las técnicas. Fue Descartes quien escribió un *Discours de la méthode*, pero el interés por el tema era ampliamente compartido. Venía incluso de la centuria anterior, de Ramus.

A Descartes le atraía, sobre todo, la posibilidad de una descripción del mundo físico mediante una *mathesis universalis*, un método de análisis basado en los procedimientos matemáticos. En la óptica cartesiana, el espacio físico se identificaba con su estructura geométrica, el mundo físico se reducía al mundo geométrico. Centra las *Regulae* en "el "orden y la medida. En la decimosexta regla encontramos el primer exponente de la historia ("a^3"). El álgebra se pone al servicio de la resolución de problemas geométricos. En 1637, Descartes redactó en Leiden el *Discurso del método* y los *Essais*, de los cuales la *Géométrie* constituía el único tratado matemático que publicó.

Los *Essais*, cuatro, se publicaron secuencialmente ese mismo año y en la ciudad mencionada, sin el nombre del autor: "Discurso sobre el método", la "Dióptrica", los "Meteoros" y la "Geometría". De lectura difícil, la *Géométrie* se teje en torno a tres hilos principales: curvas geométricas y mecánicas, el problema de Pappus "sobre las tres o cuatro rectas" y la construcción de raíces mediante curvas. La obra consta de tres libros. El primero enumera las cinco operaciones comunes, incluida la extracción de raíces. Lo mismo que hiciera Viète, introducía un segmento

de longitud unidad para asegurar la homogeneidad física subyacente de las expresiones escritas. Siguiendo a Viète, empleaba las letras *a*, *b*, o *x*, *z*, para representar longitudes conocidas o desconocidas, respectivamente. Junto con los exponentes cartesianos (z^4 o b^4), los símbolos para las operaciones básicas comprenden expresiones tales como $a + b$. Con su *Géométrie*, Descartes establece la asociación de la geometría y el álgebra, la expresión de curvas mediante ecuaciones.

La investigación de las curvas, tal la trayectoria de un proyectil o la forma de una dioptra anaclástica, modificaron el estatuto de las cónicas, hasta entonces meras entidades geométricas. Importan sobremanera las tangentes a las curvas. Los teoremas de las tangentes adquieren un significado técnico o físico y sus métodos de invención promueven la creación del cálculo infinitesimal a finales de siglo. Las curvas calculadas se convierten en instrumentos de comprensión y en dominio del mundo.

El álgebra, "esa aritmética general", había dado pasos de gigante desde los trabajos italianos y alemanes del siglo XVI, a partir de trabajos árabes, y luego los de Viète, Fermat y Descartes. Un poco más tarde, las nociones de variable y de función extienden el hallazgo. Ocurre algo similar con los procedimientos infinitesimales. Florecen nuevos conceptos: indivisibles, series convergentes o cálculos de tangentes. En 1684, la *nova methodus* de Leibniz impone el concepto de derivada, muy pronto seguida de la invención de los útiles que permiten el cálculo integral (métodos descubiertos al propio tiempo y de forma independiente por Newton). Aplicadas tales invenciones a la física, adquieren ahora carta de ciudadanía la velocidad instantánea, la aceleración y la fuerza. Las repercusiones se dejan sentir en óptica, estática, cálculo de presiones, etcétera.

De los indivisibles, en sus diversas versiones, se ocupan *in extenso* Kepler, Cavalieri, Grégoire de Saint-Vincent, Torricelli, Roberval, Pascal, Descartes y Wallis. Se asiste a un activo intercambio epistolar cuyos destinatarios y remitentes viven en Alemania, Francia, Italia e Inglaterra. Ese período transcurre desde 1615, con la publicación por Kepler de su *Nova Stereometria Doliorum Vinariorum*, hasta 1660 con el fin del concurso iniciado por Pascal sobre los juegos de azar. Si cupiera resaltar algunos jalones esenciales, citaríamos la *Geometria indivisibilibus continuorum nova quoddam ratione promota* de Cavalieri, publicada en 1635 en Bolonia, o el *Traité des indivisibles* redactado en 1636 por Roberval, más la correspondencia entre Torricelli y Roberval de los años cuarenta o las dos demostraciones cartesianas sobre la cicloide, escritas en 1638, o incluso la *Arithmetica infinitorum* de Wallis, publicada en Oxford en 1655.

No fue asunto sencillo establecer el texto originario de los *Elementos* de Euclides. Los manuscritos proceden de dos tradiciones distintas, griega y árabe. Las primeras ediciones impresas son ora aproximaciones filológicas del texto, ora comentarios filosóficos, ora profundizaciones matemáticas. Por encima de todos sobresale la labor de Christophe Clavius (1574), del que se sirvieron los autores del siglo XVII.

La adecuación entre la geometría y los fenómenos del mundo constituye para Galileo el criterio determinante de la posición filosófica de cada uno: tal es el entramado de la oposición entre Simplicio, el aristotélico de sus diálogos, y Salviati y Sagredo, el sabio moderno y el hombre honrado. Los filósofos de la naturaleza, tras la estela de Galileo, se proponen exportar los resultados de geometría pura a los dominios físicos para los cuales no se concibieron en su origen. Galileo había previsto añadir una quinta y una sexta jornadas a los *Discorsi e dimostrazioni matematiche sopra due nuove scienze*. La sexta, jamás acabada, debía tratar de la percusión y la quinta de la teoría de las proporciones. Esta no fue integrada en el tratado cuando su publicación en 1638, pero sí redactada poco después con la ayuda de Torricelli.



Frontispicio del *Novum Organum* de Francis Bacon.

Entre los enunciados euclídeos distinguimos axiomas, postulados y definiciones. Para unos, Euclides habría definido los términos y demostrado las proposiciones; para otros, ni una cosa ni otra. La lectura de Euclides por los autores del XVII dibuja así una bifurcación entre los matemáticos de la intuición y de la evidencia (Arnauld, Descartes) y los matemáticos que apoyan esta ciencia en la axiomática (Roberval, Pascal y Leibniz). Se aviva un rescoldo antañón mal apagado: axiomas, postulados y primeras proposiciones, ¿son modelos de inteligibilidad pura o puesta en forma ordenada de principios experimentales de valor general? En cuanto al postulado de las paralelas, las posturas posibles son claras: se puede aceptar el quinto postulado, se puede aceptar otro enunciado equivalente o se puede reorganizar la axiomática de la geometría elemental para convertir el postulado en teorema. Roberval se centra en la cuestión de la existencia de rectas equidistantes. El libro cuarto de sus *Elements* redefine el paralelismo por equidistancia recíproca de dos rectas. La teoría de las proporciones, heredada de los *Elementos* de Euclides, aparece ante los ojos de los matemáticos del XVII como "incontournable" incluso para sus procedimientos.

En un contexto general de debate en torno a la naturaleza de las pruebas y las causas, en el meridiano del siglo XVII, Blaise Pascal y Pierre de Fermat cruzaron una valiosa correspondencia sobre el azar. La probabilidad tiene dos aspectos. Se la asocia, por un lado, al grado de credibilidad garantizada por las pruebas e indicios y, por otro, se la vincula con la tendencia, desplegada por ciertos mecanismos de azar, a producir frecuencias estables relativas. Ninguno

de esos dos aspectos fue autoconsciente y deliberadamente aprehendido por ningún cuerpo sustancial de pensadores antes del tiempo de Pascal. Cierto es que las suertes y los juegos de azar no eran asunto inédito. A lo largo de la historia, las sociedades han columbrado su futuro mediante la lectura de las vísceras de las aves, las hojas de té o la disposición accidental de los objetos. El juego de envite constituyó una de las primeras invenciones de la sociedad humana con la taba, el hueso astrágalo que en cada lanzamiento puede adoptar una de cuatro formas. En la literatura india abundan las referencias a los dados y a los caprichos de la fortuna. Así lo leemos, por ejemplo, en el libro II del *Mahabarata*. Los dados, que encontramos también en el mundo egipcio, estuvieron muy difundidos entre los romanos. Se procuraba que estuvieran perfectamente lisos para evitar cualquier sesgo.

Los cristianos, que condenaron el vicio del juego, introdujeron nuevas formas de azar en Occidente aprendidas de los musulmanes durante las Cruzadas.

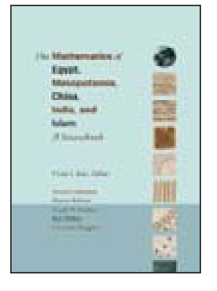
Para los medievales, el término latino *probabilitas* indicaba "algo que merece la pena ser aprobado". Distinguían entre conocimiento y opinión. En la epistemología medieval, la ciencia —*scientia*— es conocimiento, es decir, alcanzar verdades universales y necesarias. El conocimiento era distinto y mejor que la opinión. Esta remite a las creencias o doctrina no obtenidas por demostración. En la doctrina escolástica la opinión es la portadora de probabilidad. Contemporáneamente, a mediados del siglo XIII, apareció un poema titulado *De vetula* que concebía el tirar los dados en términos de frecuencias. Los naipes aparecieron en el siglo XIV.

Pero antes de 1650, apenas si podía percibirse alguna insinuación congruente con la idea de probabilidad en el sentido moderno. De una forma más o menos repentina comenzó a prestarse atención a las estadísticas de bautizos y óbitos, aparecieron las matemáticas de la aleatoriedad, se ideó un nuevo modelo de afianzar las pruebas testificales, incluso se midió la posibilidad de milagros realizados en el pasado. La obra de Cardano *De ludo aleae* (1663) definía los fenómenos aleatorios en términos de su frecuencia de aparición. En realidad quien más quien menos, todos los matemáticos de la centuria (Leibniz, Hudde Witt, Wilkins, Petty, etcétera) aportaron algo, si bien destacaron los textos de Huygens, autor en 1657 del primer manual, y, ya en el siglo siguiente, Jakob Bernoulli con su *Ars conjectandi* (1713), quien presentaba la distribución binomial y consideraba de qué modo los fenómenos aleatorios podían crear una regularidad.

La segunda mitad del XVII corresponde a la invención y primeros desarrollos del cálculo. Gottfried Wilhelm Leibniz explicitó sus ideas pioneras sobre el cálculo diferencial e integral en tres artículos aparecidos en las *Acta eruditorum* de 1684 ("Nova methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus, quae nec fractas, nec irrationales quantitates moratur, et singulare pro illis calculi genus"), 1686 ("De geometria recondita et analysi indivisibilium atque infinitorum") y 1693 ("Supplementum geometriae dimensoriae, seu generalissima omnium tetragonismorum effectio per motum; similiterque multiplex constructio lineae ex data tangentium conditione"). Según es de dominio general, Newton llegó también al descubrimiento del cálculo infinitesimal, pero la prioridad de la publicación se debe al alemán, quien tuvo, además, la extraordinaria fortuna de ser seguido por matemáticos de primera fila que facilitaron la difusión de su método.

En realidad, la fundación del cálculo infinitesimal leibniziano data de los años de su estancia diplomática en París, entre 1672 y 1676. Christiaan Huygens le había introducido en la matemática superior y, bajo su consejo, estudió la *Geometria* de Descartes, el *Opus geometricum* de Saint-Vicent y otros autores. En sus recuerdos sobre el origen del cálculo declara que, mientras reflexionaba sobre el triángulo aritmético de Pascal, se formó su propio triángulo armónico, en el que cada miembro de la secuencia era la serie suma de las series que la siguen y la serie diferencia de las series que la preceden. Esos resultados le hicieron percatarse de que la formación de la serie diferencia y de la serie suma eran operaciones mutuamente inversas. Trasladó luego esa idea a la geometría y se aplicó al estudio de las curvas. La suma de las ordenadas produce el área de la curva, para lo cual usó el signo de la integral, letra inicial del vocablo "summa". La diferencia entre dos ordenadas sucesivas, simbolizada por la *d*, permitía hallar la pendiente de la tangente.

—LUIS ALONSO



THE MATHEMATICS OF EGYPT, MESOPOTAMIA, CHINA, INDIA, AND ISLAM. A SOURCEBOOK.
Dirigido por Victor J. Katz. Princeton University Press; Princeton, 2007.

Orígenes extraeuropeos de la matemática

El quehacer matemático se ha mostrado inseparable del progreso humano

En el siglo XVII, la matemática europea había superado el nivel de sus fuentes griegas. ¿En dónde se inspiraron éstas? El lector lo hallará en el magnífico compendio de los textos fundamentales de la matemática desarrollada a extramuros de Occidente, de las cinco culturas principales que ha dirigido Victor J. Katz. Lo firman cinco autoridades en las civilizaciones en cuestión: Annette Imhausen (Egipto), Eleanor Robson (Mesopotamia), Joseph Dauben (China), Kim Plofker (India) y J. Lennart Berggren (Islam). Cada sección ofrece una revisión crítica de los extractos escogidos y una descripción histórico-científica del contenido encerrado.

Conocemos la matemática egipcia merced al hallazgo de varios papiros de interés único: Rhind, Moscú y Reisner, sobre todo. El papiro Rhind, descubierto en Tebas, a mediados del

siglo XIX y comprado en Luxor por Alexander Henry Rhind en 1856, se tradujo ya en 1877 al alemán. El papiro Moscú apareció en 1893. Pertenecen ambos al Reino Antiguo y describen sistemas metrológicos y técnicas matemáticas extraídas de la vida diaria y de las enseñanzas a los jóvenes escribas. Los papiros Reisner, correspondientes al Reino Medio, constituyen relatos de la construcción de edificios y de trabajos de carpintería, con detalles sobre salarios y días trabajados. En general, los textos matemáticos egipcios se agrupan en textos de tablas y textos de problemas. Los testimonios más antiguos pertenecen a finales del cuarto milenio antes de Cristo. Disponían de términos para la adición, sustracción, multiplicación, cuadrados y extracción de raíces cuadradas. Sólo la multiplicación y la división se expresaban por cálculos escritos.

Los arqueólogos comenzaron a desenterrar tablillas de arcilla de Mesopotamia a mediados del siglo XIX y muy pronto se percataron de que algunas contenían tablas o problemas matemáticos. Mesopotamia ocupaba el sur de Iraq y regiones limítrofes. A su cultura se le atribuía el uso del sistema sexagesimal, la aproximación a la raíz cuadrada de dos y algo de álgebra. Pero tales hallazgos, por imponentes que nos parezcan, constituyen sólo una fracción de lo que podría haberse relatado. En el cuarto milenio antes de Cristo, en torno al templo de Imana en Uruk se desarrolló una intensa actividad intelectual, social, económica y política; se adaptó un sistema de contabilidad con piezas de arcilla, donde el estilete había rayado un número, dibujado pictogramas y hendido otros datos. El tipo de metrología que allí emplearon dependía del tipo de producto en transacción. Los contables de Uruk disponían de una docena larga de sistemas metrológicos diferentes. Con el tiempo se simplificaron y redujeron. Entre las tablillas del templo estaba la pieza más antigua del mundo sobre matemática; expone dos ejercicios sobre cálculo de áreas de terreno. Varios cientos de kilómetros al norte de Uruk, encontramos, un milenio y medio más tarde, la ciudad de Nippur convertida en un importante centro religioso del reino de Babilonia. Hubo aquí una importante escuela de escribas. En el templo de Nippur se halló el diagrama topológico más antiguo que nos ha llegado. La matemática del período babilónico resolvía problemas de geometría lineal (problemas de geometría del plano), problemas de álgebra y problemas de la vida diaria (construcción y agricultura).

Los primeros documentos del quehacer matemático chino se pudieron leer en los artículos que Alexander Wylie publicó en 1852 y donde se recogían nociones de álgebra y resoluciones de problemas. La primera revisión sistemática llegaría un siglo más tarde, en 1959, con el volumen tercero de la obra de Joseph Needham *Science and Civilization in China*. La matemática, de índole práctica y utilitaria, abría la serie de sus obras capitales con *Zhou bi suan jing* (“Texto clásico sobre el gnomon de Zhou”), dedicado a asuntos astronómicos y calendáricos. A su vez, otro texto famoso, *Wu cao suan jing* (“Texto clásico sobre los cinco departamentos de gobierno”) es un compendio de problemas sobre la administración feudal. Pero ninguno gozó de mayor predicamento que el *Jiu zhang suan shu* (“Nueve capítulos de procedimientos matemáticos”) con los comentarios de Liu Hui, matemático de cuya vida sólo sabemos que transcurrió en el siglo III. El libro abarca toda la matemática conocida de su tiempo, desde las operaciones básicas para calcular con fracciones hasta problemas que implicaban el uso de métodos matriciales y una suerte de teorema de Pitágoras (el *gou-gu*). A finales de 1984 se descubrieron, en la tumba de un magnate de la dinastía Han, varios libros en tiras de bambú, entre ellos el *Suan shu shu* (“Libro sobre los números y el cálculo”), el primer libro chino dedicado en exclusiva a la matemática. Los registros iniciales de matemática china pertenecen a la dinastía Shang (siglo XVII a.C.), en forma de inscripciones sobre hueso y concha de galápago. Tratan de oráculos adivinatorios, portan caracteres especiales para el 100, el 1000 y el 10.000 y reflejan con nitidez el carácter decimal de la matemática china.

La mayor parte de la matemática hindú, elaborada en una región que abarcaba India, Pakistán, Nepal, Bangladesh y Sri Lanka, se escribió en sánscrito, el lenguaje de los Upanishads. No existen pruebas inequívocas de esa escritura anteriores al primer milenio antes de Cristo. Sus primeros textos, los Vedas, conforman un canon de himnos, invocaciones y procedimientos de los rituales religiosos. Bajo los mismos se amparan también textos astronómicos y calendáricos, los *jyotisa*. El texto más antiguo conocido, de mediados del primer milenio a.C., *Jyotisavedanga*, se propone calcular el curso temporal de los períodos rituales y alude a métodos para la medición del tiempo, en particular la longitud del día. El sistema decimal, originado tal vez en la India, alcanzó a Occidente a través del Islam. Algunos textos védicos reseñan potencias de diez.

Nuestro conocimiento de la matemática medieval islámica lo recibimos de los documentos escritos en árabe con pluma y tinta sobre papel, cuya fabricación aprendieron los árabes de los chinos cautivos tras la batalla de Atlakh (c.750). Bebieron en tres fuentes principales: matemática griega (desde los grandes clásicos geométricos como Euclides, Apolonio y Arquímedes hasta los manuales prácticos de Heron, pasando por la *Arithmetica* de Diofanto), matemática hindú (de la que tomaron el sistema decimal, métodos algebraicos, una trigonometría incipiente y métodos de geometría de sólidos para la resolución de problemas astronómicos) y una matemática de la vida diaria (desarrollada por el ejercicio de topógrafos, arquitectos, oficiales de la administración y otros). Desde el Renacimiento, los europeos, seguidores de al-Khwarizmi, sabían que el álgebra no era sólo una palabra árabe, sino también una creación islámica. Buena parte de la trigonometría del plano y esférica procedía de autores islámicos, lo que se explica por el contacto fluido y la arribada incesante de manuscritos matemáticos árabes. Las universidades contrataban profesores de árabe, que enseñaban, además, su matemática. A modo de ejemplo, la obra de Sadir al-Tusi sobre el postulado de las paralelas, escrito originalmente en 1298, se publicó en Roma en 1594 con el título en latín; en ella se basó John Wallis para apuntalar sus propias aportaciones a dicho postulado.

—*L. A.*

Jeffrey D. Sachs

Desarrollo económico con menos riesgos

Con modalidades innovadoras de seguros agrícolas se puede emprender una revolución verde en Africa y en otras regiones pobres

Vivir en el escalón más bajo de la distribución mundial de ingresos es arriesgado. Las familias pobres carecen de colchones económicos —cuentas de ahorro, seguros de salud, depósitos de agua, fuentes de ingresos diversificadas, etcétera— que los protejan de sequías, plagas, enfermedades y otros peligros. Cualquier percance, por leve que sea, como la escasez de lluvias o una infección corriente, puede resultar devastador.

Estos riesgos tienen repercusiones encadenadas. Por poner un ejemplo de especial relevancia, el beneficio económico esperado por la utilización de abonos es muy alto en Africa; aun así, los campesinos pobres no pueden adquirirlos a crédito porque sufrirían pérdidas catastróficas si fallase la cosecha. Como no pueden permitirse el riesgo de pedir un préstamo, permanecen en la indigencia. Por tanto, controlar el riesgo es importante no sólo para que su bienestar no experimente grandes altibajos, sino también para posibilitar que salgan de la extrema pobreza.

Por estas y otras razones, el control del riesgo financiero se convertirá probablemente en una de las estrategias principales para la reducción de la pobreza. Con los microcréditos se han introducido ya mercados para los pobres. De la misma manera, los microseguros y otras modalidades de control de riesgos proporcionarán nuevas herramientas importantes.

En Africa, el tradicional seguro de cosecha es casi inexistente.

Existen distintas razones por las que el seguro de cosechas es casi inexistente en Africa. Supongamos que una compañía intentara vender una póliza de seguro de cosechas a un campesino que tiene media hectárea de tierras. Una póliza corriente especificaría los pagos en caso de que se perdiese, en parte o del todo, la cosecha, a causa de infortunios concretos (sequías, plagas y temperaturas extremas). Se requeriría un modelo actuarial de los riesgos posibles y la formalización de un contrato. El pago se efectuaría sólo tras la verificación de las pérdidas y, generalmente, una vez pasado el episodio adverso.

Múltiples problemas resultarían fatales para una póliza así: la falta de un modelo de riesgo actuarial; la selección adversa (los campesinos en situaciones especialmente arriesgadas serían los más propensos a suscribirla); el llamado "riesgo moral" (los campesinos asegurados podrían no tomar otras medidas de protección); y el enorme coste relativo del mercadeo, la tramitación de los contratos y la valoración de las pérdidas.

Estos inconvenientes se están solucionando gracias a dos grandes innovaciones. La primera: en vez de asegurar la pérdida real de cosecha, una póliza podría diversificar mucho el riesgo del campesino mediante la creación de un derivado financiero —por ejemplo, un tipo de bono supeditado al clima—, que se pagaría cuando se produjesen sequías u otro tipo de adversidades. La sequía se puede demostrar objetivamente mediante estaciones meteorológicas o satélites, eliminando así la necesidad de examinar la producción de las explotaciones particulares. No habría riesgo moral y selección adversa porque el precio de los "bonos de sequía" depende de las probabilidades objetivas de las adversidades climáticas, que son mensurables, no del comportamiento de un particular.

La segunda estrategia clave consiste en que el campesino pueda combinar los bonos supeditados al clima con otros servicios financieros. Por ejemplo, un banco puede hacer un préstamo estacional a una cooperativa de cientos o miles de agricultores para una compra importante de fertilizantes y semillas de alto rendimiento; en caso de sequía se podría reducir o suspender la cuota correspondiente; los vencimientos podrían actualizarse según la duración de la sequía. A cambio, el banco compraría un bono supeditado al clima que sería su seguro en caso de una tal sequía.

Este mismo año, el Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia y la reaseguradora Swiss Re han diseñado y aplicado un contrato basado en el índice pluviométrico para la Aldea del Milenio Sauri, en Kenia occidental. La experiencia ha sido alentadora. Los climatólogos demostraron, por ejemplo, que se podían utilizar los datos de los satélites para diseñar un instrumento financiero adecuado que cubra los elevados riesgos, ligados al clima, a que se enfrenta la aldea. Otras instituciones, como el Banco Mundial, el Programa Mundial de Alimentos, el gobierno de Etiopía y varias compañías de seguros están luchando por mitigar los riesgos climáticos en otras regiones empobrecidas.

Un gran impulso de la agricultura —con el potencial para acometerlo— es fundamental para el futuro de Africa. Sus agricultores no producen comida suficiente para alimentar a un continente hambriento. Aun así, existen técnicas que podrían capacitarlos para ello si se concertara la financiación. Por tanto, lo más probable es que la revolución verde de Africa venga apoyada por una revolución financiera que aporte las técnicas de control de riesgo más recientes al servicio de algunas de las poblaciones más pobres del planeta.

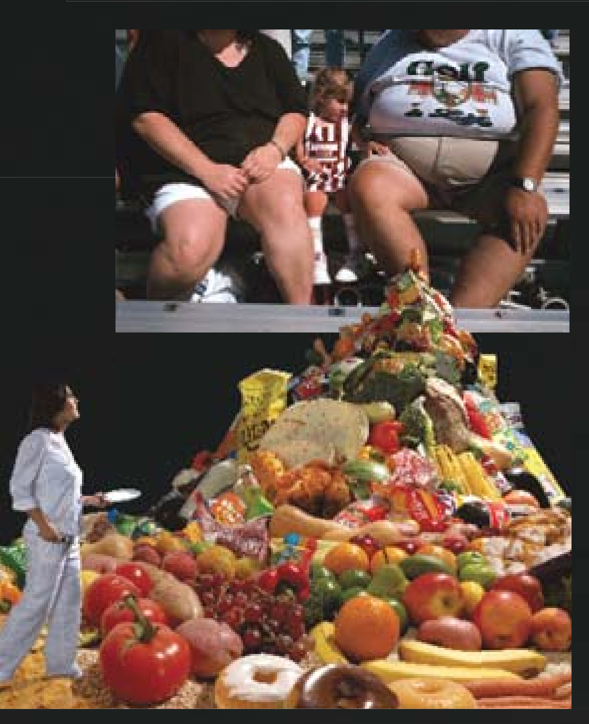
Jeffrey Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia (www.earth.columbia.edu).

EN EL PROXIMO NUMERO... ...DE NOVIEMBRE 2007



SACIEDAD Y HAMBRUNA

NUMERO MONOGRAFICO Y EXTRAORDINARIO





¿Cuál es la dieta más sana?

Fisiología de la obesidad

Genes, dieta y enfermedades cardiovasculares

Alimentos transgénicos

... Y MAS

